

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 327, № 3, 2016

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)
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)
Руи Д., PhD (Португалия)
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (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, 2016

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

ISSN 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 геологических объектов.

Журнал представляет интерес для геологов, химиков, технологов, физиков, экологов, энергетиков, специалистов по хранению и транспортировке энергоресурсов, ИТ-специалистов, а также ученых других смежных областей.

Тематические направления журнала «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов»:

- Прогнозирование и разведка георесурсов
- Добыча георесурсов
- Транспортировка георесурсов
- Глубокая переработка георесурсов
- Энергоэффективное производство и преобразование энергии на основе георесурсов
- Безопасная утилизация георесурсов и вопросы геоэкологии
- 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 327, № 3, 2016

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, 2016

AIMS AND SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

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

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

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

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

- Geo Assets Exploration and Refining;
- Geo Assets Mining;
- Geo Assets Transportation;
- Geo Assets Deep processing;
- Energy-efficient production and conversion of energy based on Geo Assets;
- Safe disposal of Geo Assets and Geoecology issues;
- 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

- Идентификация законов распределения времени работы и времени восстановления измельчительного оборудования** 6
Э.М. Геворгян
- Новые данные о специфических условиях формирования турнейских отложений Колывань–Томской складчатой зоны** 16
М.И. Шамина, А.А. Поцелуев, И.В. Рычкова, Я.Ю. Корчуганов
- Экспресс-районирование материнской свиты по плотности ресурсов генерированной нефти (на примере Нюрольской мегавпадины)** 23
В.И. Исаев, О.С. Исаева, Г.А. Лобова, В.И. Старостенко, А.Н. Фомин
- Региональные геологические факторы и сахарный диабет** 38
И.М. Фархутдинов, Л.М. Фархутдинова, Р.С. Суфияров
- Особенности режимов детерминированного хаоса преобразователей постоянного напряжения для ветро- и гелиоэлектростанций** 47
В.К. Федоров, В.В. Федянин
- Микроэлементы в почвах сопряженного ряда лесостепной зоны центральной части Тобол–Ишимского междуречья** 57
Е.Ю. Константинова
- Физические характеристики брикетов, полученных из сланцевой мелочи и древесных опилок** 67
М.Ю. Назаренко, Н.К. Кондрашева, С.Н. Салтыкова, В.Ю. Бажин
- Особенности процесса электрохимического декорирования поверхности серебра** 75
С.И. Галанин, И.С. Висковатый
- Искусственные потолочины при подземной добыче руд как альтернатива рудным целикам** 87
В.И. Голик, Ю.И. Разоренов, В.Г. Лукьянов
- К проблеме моделирования несинусоидальных режимов распределительных сетей** 95
Н.Н. Харлов, В.Я. Ушаков, Е.В. Тарасов, Л.Л. Булыга
- Исследование сезонных изменений лесной растительности Байкальского региона по поляриметрическим данным ALOS PALSAR** 103
И.И. Кирбизжекова, Е.В. Батуева
- Оценка энергетического потенциала малых рек бассейна Томи** 111
И.П. Вершинина
- Влияние азотистых соединений нефти на образование агрегатов асфальтенов** 119
Е.Ю. Коваленко, Т.А. Сагаченко, Р.С. Мин
- Получение калийно–азотного сульфатного удобрения конверсией хлорида калия серной кислотой** 127
О.Г. Шевелева, В.А. Рупчева, В.З. Пойлов
- Расчетное определение поправок на резонансное самоэкранирование активационных индикаторов из золота и тантала при облучении** 136
Ю.В. Алейников, Ю.А. Попов, И.В. Прозорова
- Identification of distribution laws of working time and recovery time of grinding equipment** 6
H.M. Gevorgyan
- New data on specific conditions of formation of Tournaisian deposits of Kolyvan–Tomsk folded zone** 16
M.I. Shaminova, A.A. Potseluev, I.V. Rychkova, Ya.Yu. Korchuganov.
- Express zoning of the parent suite on density of generated oil resources (by the example of Nyurolrka megadepression)** 23
V.I. Isaev, O.S. Isaeva, G.A. Lobova, V.I. Starostenko, A.N. Fomin
- Regional geological factors and diabetes** 38
I.M. Farkhutdinov, L.M. Farkhutdinova, R.S. Sufiyarov
- Features of the determined chaos modes of DC voltage converters for wind and solar power stations** 47
V.K. Fedorov, V.V. Fedyanin
- Microelements in soils of forest–steppe sequent series in central part of Tobol–Ishim interfluve** 57
E.Yu. Konstantinova
- Physical characteristics of briquettes produced from shale fines and sawdust** 67
M.Yu. Nazarenko, N.K. Kondrasheva, S.N. Saltykova, N.Yu. Bazhin
- Features of silver surface electrochemical decorating** 75
S.I. Galanin, I.S. Viskovaty
- Faux ceiling at underground mining as an alternative to ore pillar** 87
V.I. Golik, Yu.I. Razorenov, V.G. Lukyanov
- Problem of simulation of non-sinusoidal modes in distributed networks** 95
N.N. Kharlov, V.Ya. Ushakov, E.V. Tarasov, L.L. Bulyga
- Research of seasonal changes of forest vegetation in Baikal region on polarimetric ALOS PALSAR data** 103
I.I. Kirbizhekova, E.V. Batueva
- Evaluation of energy potential of small rivers of the Tom** 111
I.P. Vershinina
- Effect of nitrogen compounds in oil on formation of asphaltene aggregates** 119
E.Yu. Kovalenko, T.A. Sagachenko, R.S. Min
- Production of potassium–nitrogen sulfate fertilizer by conversion of potassium chloride with sulfuric acid** 127
O.G. Sheveleva, V.A. Rupcheva, V.Z. Poylov
- Calculated determination of corrections for resonance self-shielding of activation gold/tantalum detectors at irradiation** 136
Yu.V. Aleynikov, Yu.A. Popov, I.V. Prozorova

УДК 622.73:519.718:519.22

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ РАБОТЫ И ВРЕМЕНИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Геворгян Эрмине Михайловна,
hermine79@rambler.ru

Капанский филиал «Национального политехнического университета Армении»,
Армения, 3307, г. Капан, ул. Багаберд, 28.

Актуальность работы обусловлена необходимостью идентифицировать законы распределения времени работы между соседними отказами и времени восстановления оборудования технологической системы измельчения руды (ТСИР), используемые при построении компьютерной модели для оценки и анализа эффективности ее функционирования с учетом надежности оборудования.

Цель работы: идентификация законов распределения времени работы между соседними отказами, времени восстановления и оценка эксплуатационной надежности измельчительного оборудования на основании статистических данных об отказах и восстановлениях отказавшего оборудования ТСИР Зангезурского медно-молибденового комбината (ЗАО «ЗММК», Армения).

Методы исследования: теория надежности, методы прикладной статистики, методы моделирования.

Результаты. Обоснована необходимость идентификации законов распределения вероятностей времени работы между соседними отказами и времени восстановления измельчительного оборудования по экспериментальным данным. Проведен статистический анализ данных об отказах и восстановлениях измельчительного оборудования ТСИР ЗММК за трехлетний период их эксплуатации. С использованием непараметрических критериев Вилкоксона и Крускала–Уоллиса проверены гипотезы об однородности статистических выборок для однотипного оборудования. На основании статистических данных, с применением критерия согласия Пирсона выявлены и математически описаны функции плотности распределения времени работы между соседними отказами и времени восстановления отказавшего измельчительного оборудования. При этом на основании построенных гистограмм времени работы между соседними отказами и времени восстановления измельчительного оборудования автор выдвигает гипотезы о законах их распределения, рассматривая в качестве гипотетических законов распределения экспоненциальное распределение, распределение Вейбулла, логарифмически-нормальное распределение и распределение Релея. Идентифицированные законы распределения необходимы для построения компьютерной модели ТСИР, позволяющей исследовать влияние показателей надежности измельчительного оборудования на эффективность ее функционирования. Определены оценки параметров выявленных функций распределения, среднего времени работы между отказами, среднего времени восстановления и построены их доверительные границы. Определены также оценки основных количественных показателей надежности измельчительного оборудования – коэффициентов их готовности.

Ключевые слова:

Измельчение руды, отказ, восстановление, гистограмма, критерий Пирсона, готовность.

Введение

Измельчение руды является важнейшим технологическим процессом рудоподготовки, непосредственно предшествующим процессу флотации руды и в значительной мере предопределяющим его эффективность [1–3]. Как показывает практический опыт эксплуатации обогащительных фабрик, эффективность флотации заметно снижается в результате ухудшения выходных характеристик технологической системы измельчения руды (ТСИР) вследствие отказов ее оборудования [4–8]. В связи с этим вопросы исследования и обеспечения эксплуатационной надежности функционирования измельчительного оборудования и ТСИР приобретают особую важность.

Наиболее удобным, а нередко единственно возможным методом исследования надежности и эффективности функционирования сложных технологических систем, в том числе и ТСИР, является компьютерное (имитационное) моделирование [9–13]. Используемая при этом имитационная модель представляет собой композицию из трех моделей [8–9]. Одна из них воспроизводит процесс возникновения отказов и восстановления отказавшего оборудования ТСИР, вторая имитирует процесс

ее функционирования под воздействием указанного процесса, а третья служит для формирования значений условного показателя эффективности. Очевидно, что для построения первой из указанных моделей необходимо иметь функции распределения $G_i(\tau_p)$ и $F_i(\tau_B)$ времени работы между соседними отказами (τ_p) и времени восстановления (τ_B) отказавшего оборудования ТСИР.

Знание указанных функций распределения позволит также прогнозировать отказы оборудования, оценить их эксплуатационную надежность, определить оптимальные количества запасных частей, правильно организовать профилактическое обслуживание и ремонт отказавшего оборудования.

Постановка задачи

В настоящее время отсутствуют работы, посвященные идентификации функций распределения вероятностей $G_i(\tau_p)$ и $F_i(\tau_B)$ измельчительного оборудования [4–6]. В технических документациях оборудования информация относительно указанных функций распределения также отсутствует. Поэтому для их выявления необходимо использовать метод пассивного эксперимента, который

предполагает сбор и обработку статистических данных, полученных при эксплуатации оборудования.

Целью настоящей работы является выявление и математическое описание (идентификация) законов распределения времени работы между соседними отказами и времени восстановления отказавшего измельчительного оборудования путем обработки статистических данных об их надежности, полученных при эксплуатации ТСИР ЗММК.

Технологическая система измельчения руды ЗММК состоит из 21 мельницы шарового измельчения, 3 мельниц самоизмельчения, 6 двуспиральных классификаторов типа 2КСН-2,4, 10 односпиральных классификаторов типа КСН-2,0, 11 блоков гидроциклонов $\varnothing 750$ мм, 12 восьмидюймовых грунтовых насосов типа ГраК 350/40, 10-двенадцатидюймовых грунтовых насосов типа ГраК 1600/50, 24 систем смазки. Цикл шарового измельчения включает одну шаровую мельницу 1-й стадии типа МШР-3200×3100, 2 шаровые мельницы 2-й стадии типа МШР-3200×3100 стандартного размера и 18 удлиненных шаровых мельниц типа МШР-3200×3800. Шаровые мельницы работают по схеме двухстадийного измельчения при сопряжении мельниц 1:1 и 2:1. Цикл самоизмельчения руды включает 3 мельницы самоизмельчения типа ММС 70-73, работающие по схеме сопряжения 1:1 с шаровыми мельницами.

Все мельницы 1-й стадии работают с замкнутом циклом со спиральными классификаторам, то есть пески классификаторов возвращаются в мельницы 1-й стадии как циркулирующая нагрузка. Слив классификаторов и разгрузка мельниц 2-й стадии объединяются и поступают в зумпфы грунтовых насосов гидроциклонов 2-й стадии измельчения.

Шаровые мельницы 2-й стадии работают по замкнутой схеме с грунтовым насосом и батареей гидроциклонов, причем некоторые мельницы 2-й стадии измельчения одновременно подпитываются рудой из бункеров дробленой руды, что позволяет им при отказе или ремонте мельниц 1-й стадии работать в одностадийном режиме (1:0).

В измельчительных комплексах (ИК), работающих по схеме сопряжения 2:1, установлены грунтовые 12-дюймовые насосы, зарезервированные методом замещения 8-дюймовыми насосами, обеспечивающими работу ИК по схеме сопряжения 1:1 при отказе основного насоса. В ИК, работающих по схеме сопряжения 1:1, установлены грунтовые 8-дюймовые насосы, зарезервированные однотипными насосами методом замещения.

Сбор статистической информации о надежности измельчительного оборудования

С целью выявления функций $G_i(\tau_p)$ и $F_i(\tau_B)$ для элементов системы измельчения совместно с сотрудниками ЗММК в течение трех лет был проведен сбор статистической информации об отказах и восстановлениях измельчительного оборудования.

С целью рациональной организации сбора статистических данных в ТСИР были выделены следующие группы однотипных элементов, работающих в одинаковых режимах и условиях эксплуатации:

- 1) мельницы 1-й стадии типа МШР-3200×3800;
- 2) мельницы 2-й стадии типа МШР-3200×3800;
- 3) мельница 1-й стадии типа МШР-3200×3100;
- 4) мельницы 2-й стадии типа МШР-3200×3100;
- 5) двуспиральные классификаторы типа 2КСН-2,4;
- 6) системы смазки мельниц;
- 7) грунтовые насосы типа ГраК 350/40;
- 8) грунтовые насосы типа ГраК 1600/50;
- 9) мельницы самоизмельчения типа ММС-70-23;
- 10) односпиральные классификаторы типа КСН-2,0;
- 11) блоки гидроциклонов;
- 12) питатели;
- 13) транспортеры.

Сбор статистических данных продолжался до регистрации 100 отказов для групп наиболее надежных элементов. Выбор указанного объема наблюдений основывался на том, что после $n=100$ точность оценки параметров распределений увеличивается незначительно [14–17]. Собранный статистический материал подвергался предварительному анализу и систематизации, в результате чего из исходного материала были исключены явно ошибочные данные, данные об отказах, вызванных отказами других систем и нарушением правил эксплуатации. Заметим, что суммарное число отказов элементов каждой из последних трех групп элементов за три года их работы составило, соответственно, 10, 8 и 12, что недостаточно не только для выявления функций распределения, но даже для проверки гипотезы об однородности выборок.

Обработка статистической информации о надежности измельчительного оборудования

С целью объединения статистических данных однотипных элементов была проведена проверка отдельных выборок на однородность. При этом были использованы непараметрические критерии Вилкоксона [14, 16] (при двух выборках) и Крускала–Уоллиса [15] (при числе выборок больше двух). Гипотезы об однородности выборок для всех групп элементов были приняты при общем уровне значимости $\alpha=0,05$.

Для проверки согласия эмпирических и теоретических распределений, то есть гипотезы о соответствии эмпирического распределения предполагаемому теоретическому распределению $F(x)$, использовался критерий χ^2 Пирсона [14–23], который особенно мощен при больших выборках ($n \geq 100$). Критерий применим для любых видов функции $F(x)$, даже при неизвестных значениях их параметров, в чем заключается его универсальность. Использование критерия χ^2 предусматривает разбиение размаха $[x_{\min}, x_{\max}]$ варьирования выборки на интервалы длиной $\Delta x = (x_{\max} - x_{\min})/l$ и определение числа наблюдений m_j для каждого из l интервалов. Для удобства оценок параметров распре-

деления интервалы выбирают одинаковой длины. Число интервалов зависит от объема выборки. В [14, 17, 20–23] предложены несколько формул («формула Стерджесса» и др.) для определения числа интервалов. На практике обычно принимают: $l=10\dots15$ (при $n=100$), $l=15\dots20$ (при $l=200$). Интервалы, содержащие менее пяти наблюдений, объединяют с соседними.

Статистикой критерия Пирсона служит величина

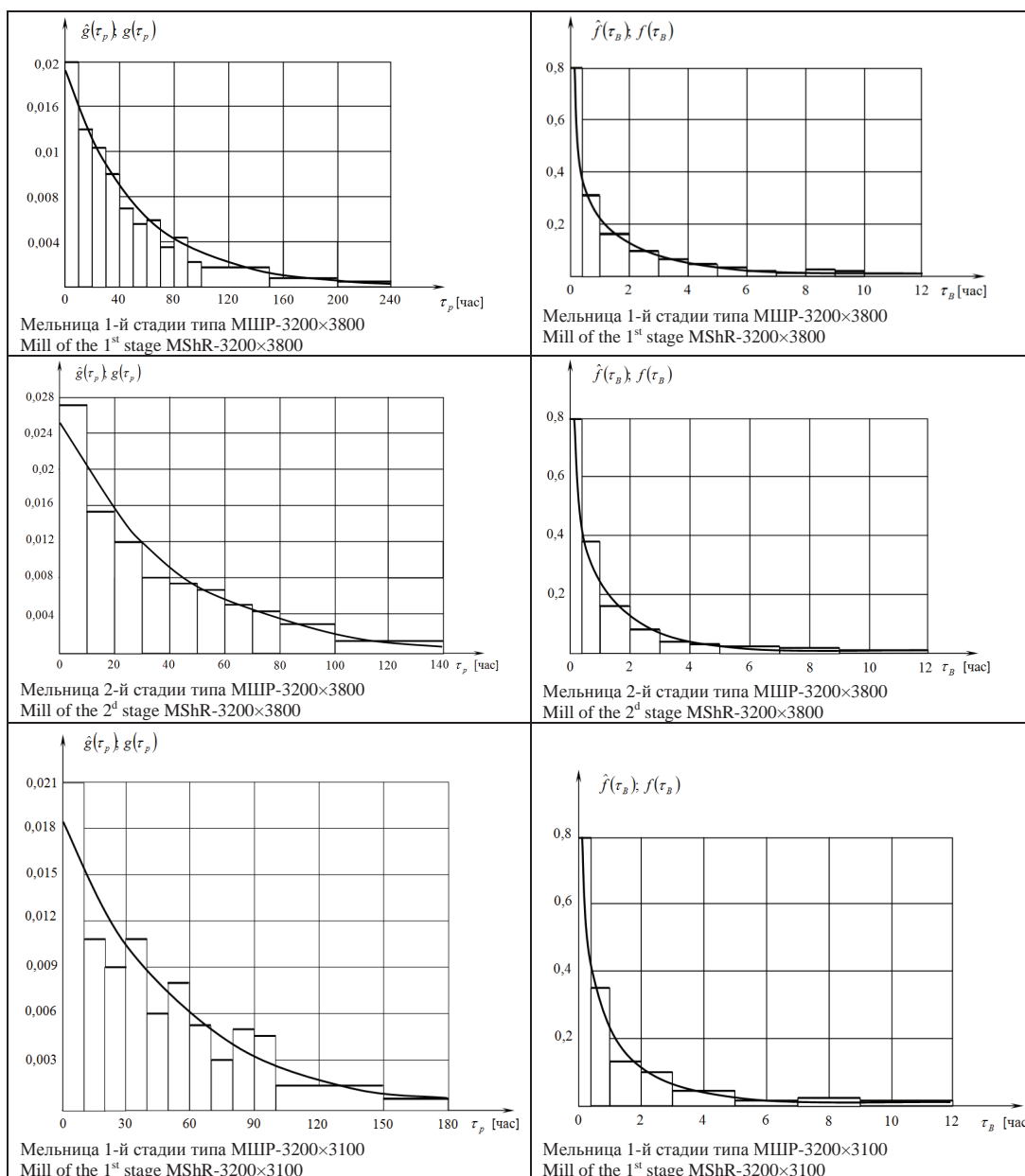
$$\chi^2 = \sum_{j=1}^l \frac{(m_j - np_j)^2}{np_j}, \quad (1)$$

где p_j – вероятность попадания исследуемой случайной величины в j -й интервал, вычисляемая в соответствии с гипотетическим законом распределением $F(x)$.

Нулевую гипотезу о соответствии выборочного распределения теоретическому закону $F(x)$ проверяют путем сравнения вычисленной по формуле (1) величины с критическим значением (квантиля) $\chi^2_{k,\alpha}$, найденным из таблицы квантилей распределения χ^2 для уровня значимости α и числа степеней свободы $k=l-r-1$. Здесь l – число интервалов после объединения; r – число параметров, оцениваемых

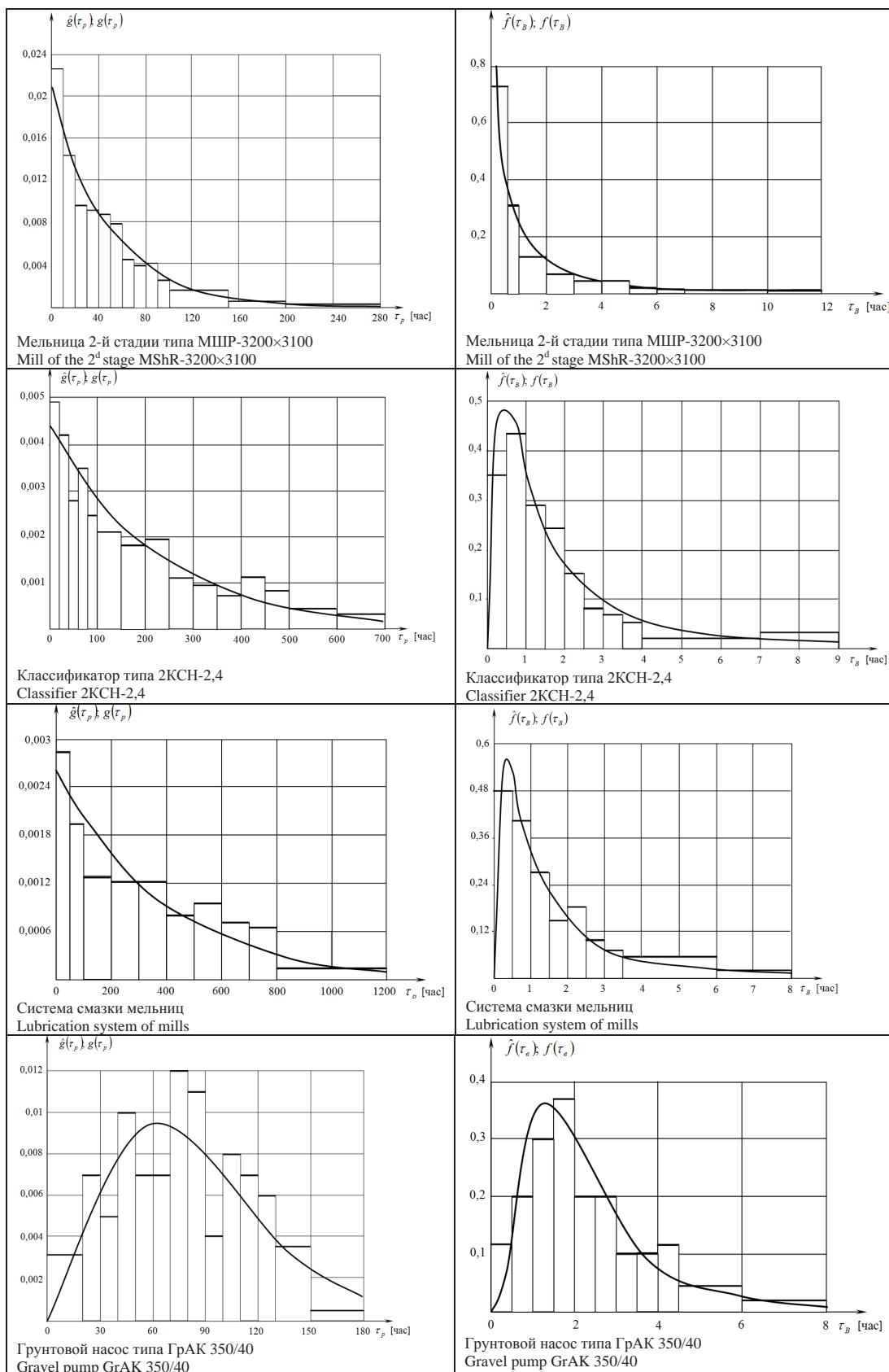
Таблица 1. Гистограммы $g(\tau_p), f(\tau_p)$ и графики теоретических функций плотности распределения времени работы $\hat{g}(\tau_p)$ и времени восстановления $\hat{f}(\tau_p)$ измельчительного оборудования

Table 1. Histograms $g(\tau_p), f(\tau_p)$ and graphics of theoretical functions of distribution density of operation time $\hat{g}(\tau_p)$ and recovery time $\hat{f}(\tau_p)$ of grinding equipment



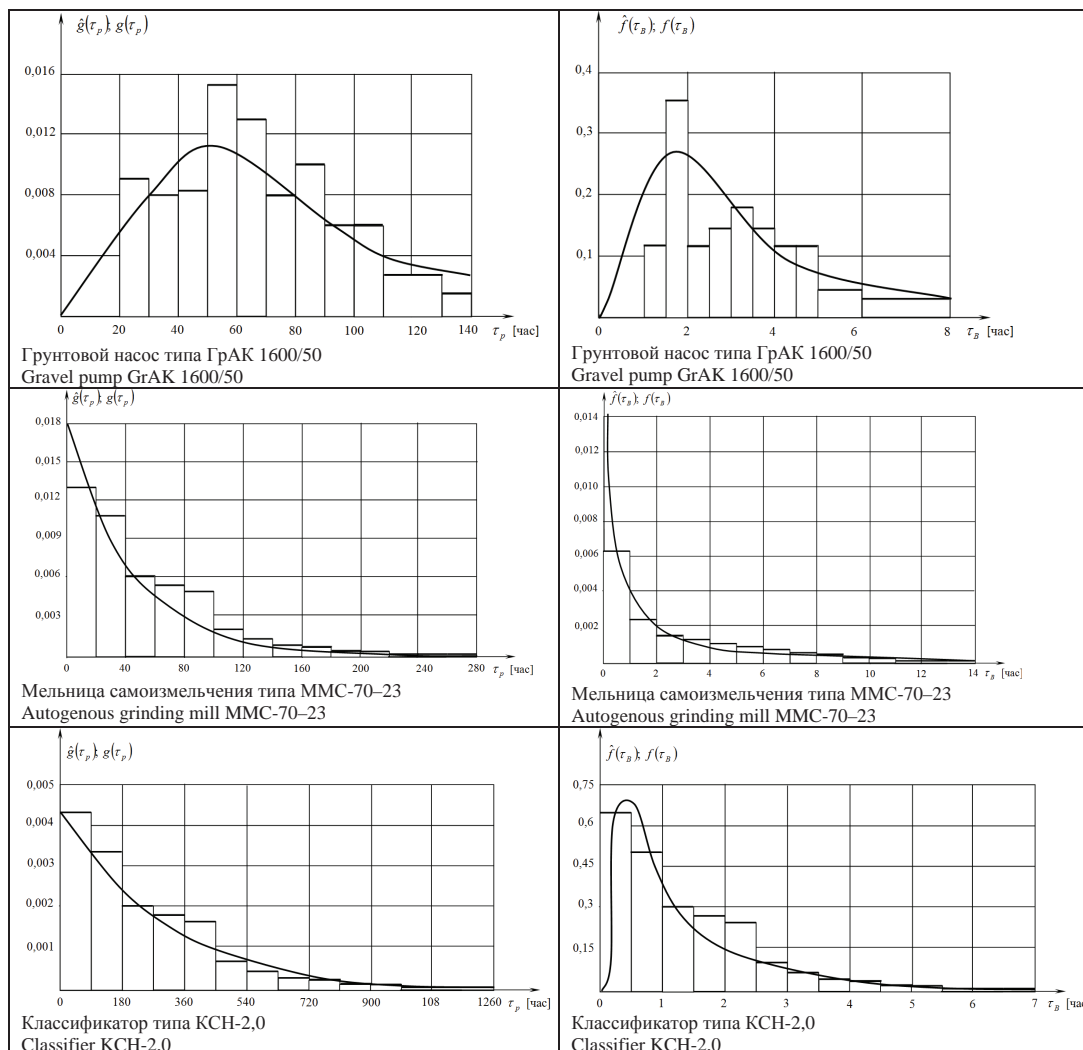
Продолжение табл. 1

Table 1



Окончание табл. 1

Table 1



по рассматриваемой выборке. Если выполняется неравенство $\chi^2 \leq \chi_{k,\alpha}^2$, то нулевую гипотезу не отвергают. При несоблюдении указанного неравенства принимают альтернативную гипотезу о принадлежности выборки неизвестному распределению.

Блок-схема алгоритма определения значений $m_j, j=\overline{1, l}$, статистических оценок функций плотностей распределения $f_j = f_j(x), j=\overline{1, l}$ а также оценок математического ожидания \bar{x} и дисперсии $\hat{\sigma}_x^2$ случайной величины x приведена на рис. 1.

На основании объединенных выборок, в соответствии с реализованным на компьютере алгоритмом (рис. 1), были построены гистограммы времени работы между отказами и времени восстановления для каждой группы элементов (табл. 1).

Исходя из вида каждой гистограммы, было выдвинуто несколько гипотез о законах распределения времени работы между отказами и времени восстановления соответствующих элементов. При этом в качестве гипотетических распределений бы-

ли рассмотрены: экспоненциальное распределение, распределение Вейбулла, логарифмически-нормальное распределение и распределение Релея.

В табл. 2 приведены оценки параметров выявленных распределений, среднего времени работы между отказами ($\bar{\tau}_p$), среднего времени восстановления ($\bar{\tau}_B$) и их доверительные границы. При вычислении перечисленных величин использовались формулы, приведенные в [14–23].

Ниже приведены аналитические выражения для идентифицированных функций плотности распределения времени работы между отказами $g(\tau_p)$ и времени восстановления $g(\tau_B)$ измельчительного оборудования:

1) мельница 1-й стадии типа МШР 3200×3800:

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot e^{-\hat{\lambda} \cdot \tau_p} = 1,925 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-1,925 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_B) = \frac{k \cdot \tau_B^{k-1}}{\hat{\alpha}} \cdot e^{-\frac{\tau_B^k}{\hat{\alpha}}} = 0,469 \cdot \tau_B^{-0,3} \cdot e^{-0,67 \cdot \tau_B^{0,7}};$$

2) мельница 2-й стадии типа МШР 3200×3800:

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot e^{-\hat{\lambda} \cdot \tau_p} = 2,45 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-2,45 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_p) = \frac{k \cdot \tau_p^{k-1}}{\hat{\alpha}} \cdot e^{-\frac{\tau_p}{\hat{\alpha}}} = 0,4956 \cdot \tau_p^{-0,4} \cdot e^{-0,826 \cdot \tau_p^{0,6}}.$$

3) мельница 1-й стадии типа МШР 3200×3100:

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot e^{-\hat{\lambda} \cdot \tau_p} = 1,785 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-1,785 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_p) = \frac{k \cdot \tau_p^{k-1}}{\hat{\alpha}} \cdot e^{-\frac{\tau_p}{\hat{\alpha}}} = 0,492 \cdot \tau_p^{-0,4} \cdot e^{-0,82 \cdot \tau_p^{0,6}};$$

4) мельница 2-й стадии типа МШР 3200×3100:

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot e^{-\hat{\lambda} \cdot \tau_p} = 2,05 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-2,05 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_p) = \frac{k \cdot \tau_p^{k-1}}{\hat{\alpha}} \cdot e^{-\frac{\tau_p}{\hat{\alpha}}} = 0,48 \cdot \tau_p^{-0,4} \cdot e^{-0,798 \cdot \tau_p^{0,6}};$$

5) классификатор типа 2КСН-2,4:

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot e^{-\hat{\lambda} \cdot \tau_p} = 4,4 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-4,4 \cdot 10^{-3} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_p) = \frac{e^{-(\lg \tau_p - \hat{\mu})^2 / 2\hat{\sigma}^2}}{\hat{\sigma} \sqrt{2\pi} \cdot \tau_p} = \frac{e^{-(\lg \tau_p - 0,14)^2 / 0,46}}{0,48 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_p};$$

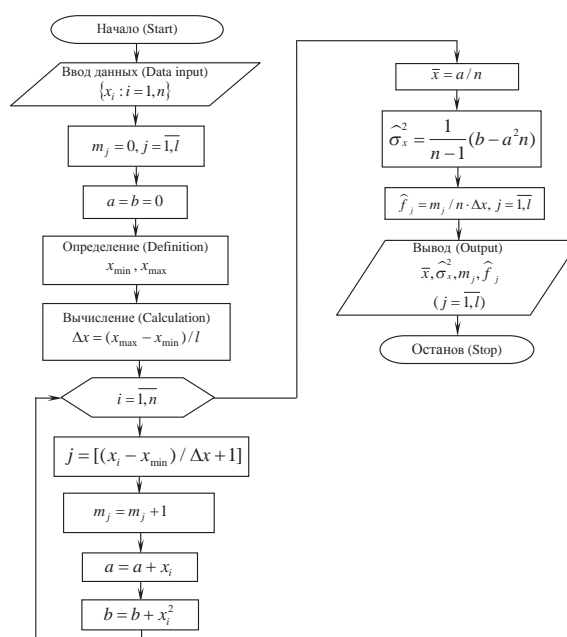


Рис. 1. Блок-схема алгоритма вычисления $m_j, \hat{f}_j, j=\overline{1, l}$, оценок \bar{x} и $\hat{\sigma}_x^2$

Fig. 1. Block diagram for calculating $m_j, \hat{f}_j, j=\overline{1, l}$, estimates of \bar{x} and $\hat{\sigma}_x^2$

Таблица 2. Оценки и доверительные границы для параметров распределений

Table 2. Estimates and confidence limits for distribution parameters

| № гр. эл. Group element | Закон распр. времени Law of time distribution τ_p / τ_b | Оценка параметров распредел. Estimation of distribution parameters τ_p | Оценка Assessment $\bar{\tau}_p$ [час] | Доверит. границы для $\bar{\tau}_p$ Confidence bounds for $\bar{\tau}_p$ [час] | | Оценка параметр. распредел. Estimation of distribution parameters τ_b | Оценка Assessment $\bar{\tau}_b$ [час] | Доверит. границы для $\bar{\tau}_b$ Confidence bounds for $\bar{\tau}_b$ [час] | |
|----------------------------|--|--|--|---|-------------|---|--|---|-------------|
| | | | | нижн. lower | верх. upper | | | нижн. lower | верх. upper |
| 1 | эксп.(exp) Вейбулла (Weibull) | $\hat{\lambda}=1,925 \cdot 10^{-2}$ | 52 | 50 | 54,1 | $k=0,7$ $\hat{\alpha}=1,772$ | 2,25 | 2,12 | 2,37 |
| 2 | эксп.(exp) Вейбулла (Weibull) | $\hat{\lambda}=2,45 \cdot 10^{-2}$ | 40,85 | 39,2 | 42,5 | $k=0,6$ $\hat{\alpha}=1,373$ | 2,06 | 1,92 | 2,2 |
| 3 | эксп.(exp) Вейбулла (Weibull) | $\hat{\lambda}=1,785 \cdot 10^{-2}$ | 56 | 52 | 60 | $k=0,6$ $\hat{\alpha}=1,3734$ | 2,05 | 1,83 | 2,3 |
| 4 | эксп.(exp) Вейбулла (Weibull) | $\hat{\lambda}=2,05 \cdot 10^{-2}$ | 48,76 | 46,8 | 50,7 | $k=0,6$ $\hat{\alpha}=1,4534$ | 2,18 | 2,04 | 2,33 |
| 5 | эксп.(exp) лог.норм. (log.norm) | $\hat{\lambda}=4,39 \cdot 10^{-9}$ | 227,6 | 212 | 243 | $\hat{\mu}=0,14$ $\hat{\sigma}=0,48$ | 2,5 | 2,3 | 2,75 |
| 6 | эксп.(exp) лог.норм. (log.norm) | $\hat{\lambda}=2,59 \cdot 10^{-3}$ | 386,2 | 351 | 420 | $\hat{\mu}=0,12$ $\hat{\sigma}=0,52$ | 2,71 | 2,4 | 3,1 |
| 7 | Релея (Rayleigh) лог.норм. (log.norm) | $\hat{\sigma}=65$ | 81,5 | 77,5 | 85 | $\hat{\mu}=0,292$ $\hat{\sigma}=0,295$ | 2,48 | 232 | 2,62 |
| 8 | Релея (Rayleigh) лог.норм. (log.norm) | $\hat{\sigma}=65,15$ | 70,5 | 66 | 72 | $\hat{\mu}=0,4555$ $\hat{\sigma}=0,313$ | 3,69 | 3,45 | 3,95 |
| 9 | эксп.(exp) Вейбулла (Weibull) | $\hat{\lambda}=1,81 \cdot 10^{-2}$ | 55,25 | 53,2 | 57,5 | $k=0,7$ $\hat{\alpha}=1,591$ | 2,455 | 2,250 | 2,653 |
| 10 | эксп.(exp) лог.норм. (log.norm) | $\hat{\lambda}=5,2 \cdot 10^{-3}$ | 192,3 | 180,5 | 204,1 | $\hat{\mu}=0,18$ $\hat{\sigma}=0,52$ | 2,014 | 1,80 | 2,25 |

6) система смазки мельниц:

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot e^{-\hat{\lambda} \cdot \tau_p} = 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-2,6 \cdot 10^{-3} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_b) = \frac{e^{-(\lg \tau_b - \hat{\mu})^2 / 2\hat{\sigma}^2}}{\hat{\sigma} \sqrt{2\pi} \cdot \tau_b} = \frac{e^{-(\lg \tau_b - 0,12)^2 / 0,52}}{0,52 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_b};$$

7) грунтовой насос типа ГрАК 350/40:

$$g_i(\tau_p) = \frac{\tau_p}{\hat{\sigma}^2} \cdot e^{-\frac{\tau_p^2}{2\hat{\sigma}^2}} = \frac{\tau_p}{4225} \cdot e^{-\frac{\tau_p^2}{8450}},$$

$$f_i(\tau_b) = \frac{e^{-(\lg \tau_b - \hat{\mu})^2 / 2\hat{\sigma}^2}}{\hat{\sigma} \sqrt{2\pi} \cdot \tau_b} = \frac{e^{-(\lg \tau_b - 0,292)^2 / 0,174}}{0,295 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_b};$$

8) грунтовой насос типа ГрАК 1600/50:

$$g_i(\tau_p) = \frac{\tau_p}{\hat{\sigma}^2} \cdot e^{-\frac{\tau_p^2}{2\hat{\sigma}^2}} = \frac{\tau_p}{3150} \cdot e^{-\frac{\tau_p^2}{6300}},$$

$$f_i(\tau_b) = \frac{e^{-(\lg \tau_b - \hat{\mu})^2 / 2\hat{\sigma}^2}}{\hat{\sigma} \sqrt{2\pi} \cdot \tau_b} = \frac{e^{-(\lg \tau_b - 0,4555)^2 / 0,196}}{0,313 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_b};$$

9) мельница самоизмельчения типа ММС-70-23:

$$g_i(\tau_p) = 1,81 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-1,81 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_b) = 0,44 \cdot \tau_b^{-0,3} \cdot e^{-0,63 \cdot \tau_b^{0,7}},$$

10) односпиральный классификатор типа КСН- 2,0:

$$g_i(\tau_p) = 5,2 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-5,2 \cdot 10^{-3} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_b) = \frac{e^{-(\lg \tau_b - 0,18)^2 / 0,5}}{0,52 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_b}.$$

С использованием полученных оценок $\bar{\tau}_{pi}$ и $\bar{\tau}_{bi}$, $i=1,10$ определены стационарные значения коэффициентов готовности измельчительного оборудования (табл. 3) по формуле [17, 19, 20]

$$K_{Gi} = \bar{\tau}_{pi} / (\bar{\tau}_{pi} + \bar{\tau}_{bi}).$$

Этот коэффициент характеризует готовность измельчительного оборудования к выполнению заданных функций и представляет собой вероятность того, что оборудование окажется работоспособным в произвольный момент времени, с учетом только внеплановых простоев.

Судя по значениям коэффициента готовности, сравнительно высокой надежностью обладают системы смазки мельниц и спиральные классификаторы. Показатели надежности мельниц невысокие и мало отличаются друг от друга. Как и ожидалось, надежность 8-дюймовых грунтовых насосов, работающих в сравнительно легких условиях, заметно выше надежности 12-дюймовых насосов.

Полученные оценки коэффициентов готовности измельчительного оборудования обуславливают необходимость проведения исследований, направленных на повышение их эксплуатационной надежности.

Таблица 3. Значения коэффициентов готовности измельчительного оборудования

Table 3. Values of availability ratio of grinding equipment

| № гр. эл. Group element | Наименование оборудования Name of equipment | Значение коэффициента готовности Value of availability coefficient |
|----------------------------|---|---|
| 1 | Мельницы 1-й стадии типа МШР-3200×3800 Mills of 1 st stage of type MShR-3200×3800 | 0,95852 |
| 2 | Мельницы 2-й стадии типа МШР-3200×3800 Mills of 2 nd stage of type MShR-3200×3800 | 0,95199 |
| 3 | Мельница 1-й стадии типа МШР-3200×3100 Mill of 1 st stage of type MShR-3200×3100 | 0,96468 |
| 4 | Мельницы 2-й стадии типа МШР-3200×3100 Mills of 2 nd stage of type MShR-3200×3100 | 0,95720 |
| 5 | Двухспиральные классификаторы типа 2КСН-2,4 Double-spiral classifiers of type 2КСН-2.4 | 0,98913 |
| 6 | Системы смазки мельниц Lubrication systems of mills | 0,99303 |
| 7 | Грунтовые насосы типа ГрАК 350/40 Gravel pumps of type GrAK 350/40 | 0,97047 |
| 8 | Грунтовые насосы типа ГрАК 1600/50 Gravel pump of type GrAK 1600/50 | 0,95026 |
| 9 | Мельницы самоизмельчения типа ММС-70-23 Autogenous grinding mill type ММС-70-23 | 0,95745 |
| 10 | Односпиральные классификаторы типа КСН-2,0 One spiral classifiers of type КСН-2,0 | 0,98963 |

Выводы

Обоснована необходимость идентификации законов распределения вероятностей времени работы между соседними отказами и времени восстановления измельчительного оборудования по экспериментальным данным. Совместно с сотрудниками ЗММК в течение трех лет был проведен сбор статистической информации об отказах и восстановлениях измельчительного оборудования.

С использованием непараметрических критериев Вилкоксона и Крускала–Уоллиса проверены гипотезы об однородности выборок для однотипных оборудований. Из-за относительно высокой надежности гидроциклонов, питателей и транспортеров суммарное число отказов за трехлетний период их эксплуатации оказалось недостаточным не только для идентификации законов распределения вероятностей, но даже для проверки гипотезы об однородности выборок.

Выявлены и математически описаны функции плотности распределения времени работы между соседними отказами и времени восстановления отказавшего измельчительного оборудования ТСИР ЗММК. Для проверки согласия эмпирических и теоретических распределений использовался критерий χ^2 Пирсона, который особенно мощен при

больших выборках. На основании построенных гистограмм времени работы между соседними отказами и времени восстановления измельчительного оборудования были выдвинуты гипотезы о законах их распределения. При этом в качестве гипотетических законов распределения были рассмотрены: экспоненциальное распределение, логарифмически-нормальное распределение и распределение Вейбулла и Релея.

Идентифицированные законы распределения были использованы при построении компьютерной модели ТСИР, позволяющей оценить и исследовать влияние показателей надежности измельчительного оборудования на эффективность функционирования системы [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдохин В.М. Основы обогащения полезных ископаемых. Т. 1. Обогащительные процессы. – М.: Изд-во «Горная книга», 2014. – 417 с.
2. Разработка и применение АСУ процессами обогащения полезных ископаемых / В.В. Морозов, В.П. Топчаев, К.Я. Улитенко, З. Ганбаатар, Л. Далгэрбат. – М.: Изд. дом «Руда и Металлы», 2013. – 512 с.
3. Оптимизация процесса измельчения на основе применения алгоритма взаимосвязанного регулирования производительности и водных режимов / З. Ганбаатар, Л. Далгэрбат, А.Ф. Кузнецов, О.М. Дуда, В.В. Морозов // Горный журнал. – 2011. – № 10. – С. 79–82.
4. Курбатова О.А., Ксендзенко Л.С., Николайчук Д.Н. Надежность горных машин. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2005. – 119 с.
5. Карепов В.А., Безверхая Е.В., Чесноков В.Т. Надежность горных машин и оборудования. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2012. – 134 с.
6. Боярских Г.А. Надежность горных машин и оборудования. – Екатеринбург: УГТУ, 2009. – 116 с.
7. Баласанян С.Ш., Симонян С.О., Геворгян Э.М. Компьютерная модель для стохастического управления технологическим процессом флотации руды с учетом надежности измельчительного оборудования // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 5. – С. 50–57.
8. Баласанян С.Ш. Компьютерная модель процесса возникновения отказов и восстановления оборудования системы измельчения руды // Цветные металлы. – 2012. – № 7. – С. 82–86.
9. Баласанян С.Ш. Стратифицированная модель для оценки и анализа эффективности функционирования сложных технологических систем со многими состояниями // Известия ТПУ. – 2011. – Т. 318. – № 5. – С. 25–30.
10. Simulation Methods for Reliability and Availability of Complex Systems / J. Faulin, A.A. Juan, S. Martorella, J.-E. Ramirez-Markes. – London: Springer, 2010. – 315 p.
11. Myers A. Complex System Reliability. Multichannel Systems with Imperfect Fault Coverage. – New York: Springer, 2010. – 240 p.
12. Simulation and Modeling of Systems / Ed. by P. Cantot, D. Luceaux. – Bagnaux, France: DGA, 2011. – 400 p.
13. Law A.M., Kelton W.D. Simulation Modeling and Analysis. – Boston: McGraw-Hill, 2007. – 768 p.
14. Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Контроль качества. – М.: Мир, 1970. – 368 с.
15. Браунли К. Статистическая теория и методология в науке и технике. – М.: Наука, 1974. – 408 с.
16. Statistical Reliability Engineering / B. Gnedenko., I. Ushakov, I.V. Pavlov, S. Chakravanty. – Hoboken (New Jersey): Wiley, 1999. – 528 p.
17. Вентцель Е. Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 2002. – 575 с.
18. Ushakov I. Handbook of Reliability Engineering. – Hoboken: Wiley, 1994. – 704 p.
19. Ushakov I. Probabilistic Reliability Models. – Hoboken: Wiley, 2012. – 248 p.
20. Бахрушин В.Е. Проблемы идентификации моделей распределения случайных величин с применением современного программного обеспечения // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 11. – С. 50–54.
21. Кузнецова О.С. Теория вероятности и математическая статистика. Краткий курс. – М.: Изд-во «Окей-книга», 2013. – 191 с.
22. Рудаков И.С., Рудаков С.В., Богомолов А.В. Методика идентификации вида закона распределения параметров при проведении контроля состояния сложных систем // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2007. – Т. 5. – № 1. – С. 66–72.
23. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход: монография / Б.Ю. Лемашко, С.В. Лемашко, С.Н. Постовалов, Е.В. Чимитова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 888 с.

Поступила 27.11.2015 г.

Информация об авторах

Геворгян Э.М., преподаватель кафедры информационных технологий, информатики и автоматизированных систем Капанского филиала Национального политехнического университета Армении.

UDC 622.73:519.718:519.22

IDENTIFICATION OF DISTRIBUTION LAWS OF WORKING TIME AND RECOVERY TIME OF GRINDING EQUIPMENT

Hermine M. Gevorgyan,
hermine79@rambler.ru

National polytechnic university of Armenia,
Kapan branch, 28, Baghaberd Street, Kapan, 3307, Armenia.

The relevance of the discussed issue is caused by the need to identify distribution laws of working time between neighboring failures and recovery time of equipment of ore grinding technological system (OGTS), which are used when developing a computer model to assess and analyze its functioning efficiency, taking into account the equipment reliability.

The main aim of the study is to identify the distribution laws of working time between the neighboring failures, recovery time and to assess the exploitation reliability of grinding equipment based on statistic data on failures and recovery of the failed equipment of OGTS at Zangezur copper molybdenum combine (ZCMC, Armenia).

The methods used in the study: theory of reliability, methods of applied statistics, modeling methods.

The results. The author has substantiated the necessity of identifying the distribution laws of working time probability between neighboring failures and recovery time of grinding equipment based on the experimental data. The statistics on failures and recoveries of grinding equipment of OGTS ZCMC for three years of their exploitation was collected. Using a non-parametric Wilcoxon test and the Kruskal–Wallis test the author checked the hypotheses on homogeneity of statistical sampling for the same type of equipment. Based on statistic data, applying the Pearson's criterion of agreement the author identified and mathematically described the density functions of time distribution between the neighboring failures and recovery time of the failed grinding equipment. On the basis of the developed histograms of working time between neighboring failures and recovery time of grinding equipment the author put forward the hypotheses on the laws of their distribution, considering the exponential distribution, Weibull, lognormal and Rayleigh distributions as hypothetical distribution laws. The identified distribution laws are required to develop the OGTS computer model, which allows investigating the impact of reliability indicators of grinding equipment on the system functioning efficiency. The author determined the estimations of the parameters of the identified distribution functions, the average working time between the neighboring failures, the mean time to repair and built their confidence bounds. The estimates of the main quantitative indicators of grinding equipment reliability were determined as well.

Key words:

Ore grinding, failure, recovery, histogram, Pearson's criterion, availability.

REFERENCES

1. Avdokhin V.M. *Osnovy obogashcheniya poleznykh iskopaemykh. T. 1. Obogatitelnye protsessy* [The fundamentals of mineral processing. Vol. 1. Mineral processing]. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2014. 417 p.
2. Morozov V.V., Topchaev V.P., Ulitenko K.Ya., Ganbaatar Z., Delgerbat L. *Razrabotka i primeneniye avtomatizirovannykh sistem upravleniya protsessami obogashcheniya poleznykh iskopaemykh* [Development and application of automated systems for controlling mineral processing]. Moscow, Ruda i Metally Publ., 2013. 512 p.
3. Ganbaatar Z., Delgerbat L., Kuznetsov A.F., Duda O.M., Morozov V.V. Grinding optimization on the basis of application of the algorithm of interconnected capacity control and water regimes. *Gornyy zhurnal*, 2011, no. 10, pp. 79–82. In Rus.
4. Kurbatova O.A., Ksendzenko L.S., Nikolaychuk D.N. *Nadezhnost gornyykh mashin* [Reliability of mining machines]. Vladivostok, DVSTU Publ., 2005. 119 p.
5. Karepov V.A., Bezverkhaya E.V., Chesnokov V.T. *Nadezhnost gornyykh mashin i oborudovaniya* [Reliability of mining machines and equipment]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2012. 134 p.
6. Boyarskikh G.A. *Nadezhnost gornyykh mashin i oborudovaniya* [Reliability of mining machines and equipment]. Ekaterinburg, UGTU Publ., 2009. 116 p.
7. Balasanyan S.Sh., Simonyan S.O., Gevorgyan H.M. Computer model for stochastic control of the ore flotation considering grinding equipment reliability. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 5, pp. 50–57. In Rus.
8. Balasanyan S.Sh. Computer model of the failure and recovery processes of ore grinding system equipment. *Tsvetnye metally*, 2012, no. 7, pp. 82–86. In Rus.
9. Balasanyan S.Sh. A stratified model for evaluating and analyzing the efficiency of multistate complex technological systems functioning. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 5, pp. 25–30. In Rus.
10. Faulin J., Juan A.A., Martorella S., Ramires-Markes J.-E. *Simulation Methods for Reliability and Availability of Complex Systems*. London, Springer, 2010. 315 p.
11. Myers A. *Complex System Reliability. Multichannel Systems with Imperfect Fault Coverage*. New York, Springer, 2010. 240 p.
12. *Simulation and Modeling of Systems*. Ed. by P. Cantot, D. Luzeaux. Bagnaux, France, DGA, 2011. 400 p.
13. Law A.M., W.D. Kelton. *Simulation Modeling and Analysis*. Boston, McGraw-Hill, 2007. 768 p.
14. Shtorm R. *Teoriya veroyatnostey. Matematicheskaya statistika. Kontrol kachestva* [The theory of probability. Mathematical statistics. Quality control]. Moscow, Mir Publ., 1970. 368 p.
15. Braunly K. *Statisticheskaya teoriya i metodologiya v nauke i tekhnike* [Statistical theory and methodology in science and technology]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 408 p.
16. Gnedenko B., Ushakov I., Pavlov I., *Chakravanty S. Statistical Reliability Engineering*. Hoboken (New Jersey), Wiley, 1999. 528 p.
17. Venttsel E.S. *Teoriya veroyatnostey* [The theory of probability]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2002. 575 p.
18. Ushakov I. *Handbook of Reliability Engineering*. Hoboken, Wiley, 1994. 704 p.

19. Ushakov I. *Probabilistic Reliability Models*. Hoboken, Wiley, 2012. 248 p.
20. Bakhrushin V.E. The problem of identifying distribution models of random variables applying modern software. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2011, no. 1, pp. 50–54. In Rus.
21. Kuznetsov O.S. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow, Okey-kniga Publ., 2013. 191 p.
22. Rudakov I.S., Rudakov S.V., Bogomolov A.V. The method of identifying the type of distribution law of parameters when monitoring the state of complex systems. *Informatsionno-izmeritelnye i upravlyayushchie sistemy*, 2007, vol. 5, no. 1, pp. 66–72. In Rus.
23. Lemashko B.Yu., Lemashko S.B., Postovalov S.N., Chimitova E.V. *Statisticheskiy analiz dannykh, modelirovanie i issledovanie veroyatnostnykh zavisimostey. Kompyuterny podkhod. Monografiya* [Statistical data analysis, modeling and studying the probability laws. Computer approach. Monograph]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011. 888 p.

Received: 27 November 2015.

Information about the authors

Hermine M. Gevorgyan, Lecturer of the Department «Information technologies, computer and automated systems» Kapan Branch of «National Technical University of Armenia», National polytechnic university of Armenia.

УДК 552.54:551.73(571.1)

НОВЫЕ ДАННЫЕ О СПЕЦИФИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ФОРМИРОВАНИЯ ТУРНЕЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ КОЛЫВАНЬ-ТОМСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ЗОНЫ

Шамина Марина Ивановна¹,
mshaminova@mail.ru

Поцелуев Анатолий Алексеевич¹,
poceluevaa@ignd.tpu.ru

Рычкова Ирина Владимировна¹,
irina.rychkova@mail.ru

Корчуганов Яков Юрьевич¹,
ya.korchuganov@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail:

Актуальность работы обусловлена необходимостью выяснения влияния палеосейсмичности на катагенетические преобразования терригенных отложений турнейского возраста, представленных в Колывань-Томской складчатой зоне ярской толщей, в связи с нефтегазоносностью. Решение этого вопроса может существенно повлиять на оценку перспектив нефтегазоносности глубоких горизонтов Западно-Сибирской плиты.

Цель работы: выяснение особенностей осадконакопления и преобразования турнейских отложений ярской толщи в пределах Колывань-Томской складчатой зоны (в районе г. Томска) под влиянием дислокаций.

Методы исследований: литологопетрографические (гранулометрический, типизация пород с использованием диаграммы В.Д. Шванова, а также анализ аутигенного минералообразования), палеонтологические, литогеохимические (рентгеноструктурный и расчеты петрохимических модулей по Я.Э. Юдовичу и М.П. Кетрис). Для изучения проявлений битуминозности был использован люминесцентно-микроскопический метод.

Результаты. Комплексный подход к изучению турнейских отложений Колывань-Томской складчатой зоны, представленных ярской толщей, позволил установить специфические условия их седиментации и преобразования. Формирование отложений ярской толщи происходило в прибрежно-морских условиях. Среди терригенных отложений выявлены признаки сейсмодислокаций. О признаках сейсмодислокаций свидетельствуют следы оползания пластичного осадка в пределы тонкотерригенных прослоев, смещений осадка, кластические дайки, а также секущие поверхности, приводящие к нарушению нормальной последовательности слоев во время формирования толщи. Терригенные отложения ярской толщи характеризуются частым переслаиванием пластичных и относительно хрупких пород, в которых зафиксированы горизонты с включениями и «штокверковые» текстуры. Впервые в верхней части ярской толщи турнейского возраста установлены сингенетично-битуминозные аргиллиты и миграционные битумоиды. Битуминизация проходила до палеосейсмичности.

Ключевые слова:

Колывань-Томская складчатая зона, ярская толща, турнейские отложения, палеосейсмичность, сейсмодислокации, «штокверковая» текстура, битуминозность.

Введение

Изучением геологического строения Колывань-Томской складчатой зоны занимаются более ста лет. Однако, на некоторые аспекты геологической истории развития существуют разные точки зрения. Колывань-Томская складчатая зона сложена сложнодислоцированными породами органогенно-терригенного генезиса [1], формировавшихся от среднедевонской до среднекаменноугольной эпох [2]. Колывань-Томская складчатая зона представляет собой единственное место на всей огромной Зауральской территории, где турнейские отложения фундамента молодой эпигерцинской Западно-Сибирской платформы выходят на дневную поверхность [3]. Поэтому изучение складчатой зоны позволяет яснее представить продолжение структур в пределах Западно-Сибирской плиты и сделать выводы об истории геологического развития региона.

Кроме того, проблема нефтегазоносности палеозоя Западно-Сибирской плиты остается дискуссионной [4]. Комплексное изучение отложений Колывань-Томской складчатой зоны и решение вопросов, связанных с формированием турнейских отложений, проявлением битуминозности может существенно повлиять на оценку перспектив нефтегазоносности глубоких горизонтов Западно-Сибирской плиты.

Характеристика турнейских отложений (ярская толща)

Нижние горизонты турнейских отложений (ярская толща) обнажаются в устье р. Шумихи, правом притоке р. Томи (шумихинские слои), в 30 км от г. Томска, где они представлены известковистыми алевролитами и известняками. Выше по разрезу, в обнажении у с. Ярское, толща представлена серыми алевролитами, аргиллитами и песчаника-

ми. Породы характеризуются ритмичной горизонтальной, косой слойчатостью, присутствием знаков ряби, ориентировка которых близка к меридиональной. На отдельных участках среди аргиллитов и алевролитов отмечаются деформационные текстуры, характеризующиеся появлением овальных обособлений песчаников, ориентированных субпараллельно слойчатости вмещающих пород (конволютная слойчатость) (рис. 1), а в шлифах – кластические дайки (рис. 2).



Рис. 1. Конволютная слойчатость

Fig. 1. Convolute bedding

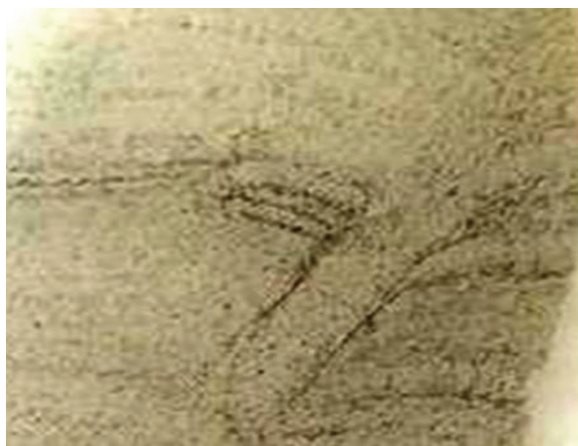


Рис. 2. Кластическая дайка в шлифе (250x)

Fig. 2. Clastic dike in thin section (250x)

В результате комплексного изучения терригенных отложений верхней части ярской толщи были выделены на участках ненарушенного залегания следующие петротипы [5]: песчаники (кварцевые граувакки), алевролиты и аргиллиты. Кварцевые граувакки характеризуются разнозернистыми псаммитовыми структурами. Текстуры однородные, слабоориентированные, слоеватые. Обломки составляют от 38 до 60 % от площади шлифа и представлены преимущественно полуугловатыми, угловатыми обломками кварца, полевых шпатов (калиевым полевым шпатом и кислыми плагио-

клазами) и обломками пород (микрокварцитами, кварцсерицитовыми сланцами). Сортировка обломочного материала плохая, степень преобразования средняя.

Постдиагенетические преобразования выражены в растворении и частичном замещении зерен полевых шпатов, коррозии и регенерации кварца. Это характерно для зон тектонических напряжений, которые создают в породах микрозоны локализации повышенных и пониженных давлений, приводящих к растворению и регенерации минералов и диффузии растворенных веществ в места с пониженными напряжениями [6, 7].

Состав цементирующей массы преимущественно гидрослюдисто-кальцитовый, на отдельных участках кремнистый. Структура цемента контакто-поровая, коррозионная. Органическое вещество представлено битуминозными компонентами.

Алевролиты характеризуются мелкозернистыми алевроитовыми структурами. Текстуры однородные, обломки составляют до 90 % от площади шлифа и представлены преимущественно кварцем, полевыми шпатами и обломками пород (микрокварцитами). Контакты обломков преимущественно точечные, линейные и конформные.

Цемент преимущественно поровый, коррозионный, кремнисто-карбонатный. Вторичные изменения достаточно интенсивные: коррозия и регенерация обломков кварца, пелитизация и серицитизация полевых шпатов. В алевролитах обнаружены известковые шаровидные и трубчатые фораминиферы с тонкостенными раковинами, что указывает на существование их в неглубоком, относительно тепловодном, нормально-соленом морском бассейне. Поступавший во время седиментации ярской толщи терригенный материал отличался тонкозернистостью, что не нарушило целостности раковин.

Аргиллиты характеризуются алевропелитовыми структурами. Текстуры однородные, слабоориентированные. Примесь мелкого алевроитового материала составляет 10–15 % от площади шлифа. Обломки алевроитовой размерности представлены преимущественно кварцем и полевыми шпатами. В основной массе пород преобладают гидрослюды и мусковит, отмечается небольшая примесь хлорита и кальцита.

Среди аргиллитов выделяются горизонты с высоким содержанием сингенетичных битумоидов. Состав битумоидов изменяется от смолисто-асфальтенового до маслянистого, распределение равномерно рассеянное и пятнистое. В перекрывающих эти прослои песчаниках и алевролитах выявлены миграционные битумоиды, приуроченные к поровому пространству, трещинам и цементирующему веществу. Поступление битумоидов было неоднократным, что подчеркивается соотношением трещин разных генераций.

Во всех выделенных петротипах в ультрафиолетовом свете обнаруживается то или иное количе-

ство эпигенетического битуминозного вещества, приуроченного к тонким трещинкам отрыва, трещинам кливажа. Нередко образуется серия трещин, заполненных битуминозным веществом смолисто-асфальтенового состава, напоминающих «штокверковую текстуру» (рис. 3). Все эти факты указывают на периодические резкие возрастания интенсивности тектонической деятельности.

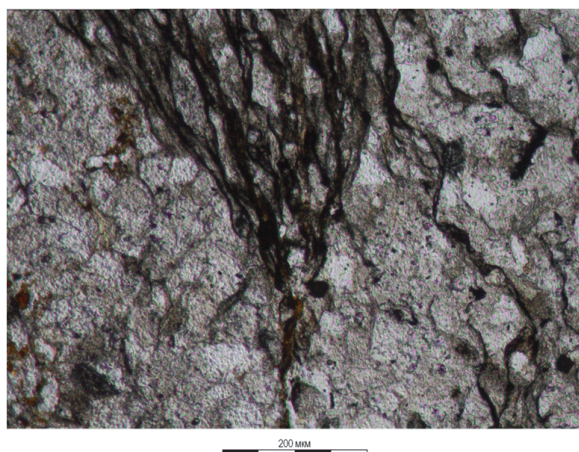


Рис. 3. «Штокверковая» текстура

Fig. 3. «Stockwork» texture

По результатам рентгено-структурного анализа в ярской толще впервые выделено органо-минеральное вещество t-Butylammoniumhydrogensele-nite ($C_4H_{13}NO_3Se$), кристаллизующееся в моноклинной сингонии. Появление такого вещества, возможно, связано с преобразованием водорослевой органики, характеризующейся высоким содержанием селена. Известно, что среди органического вещества горючих сланцев преобладают зеленые водоросли [8]. Возможно, этот факт свидетельствует о формировании изучаемых отложений в прибрежно-морской обстановке.

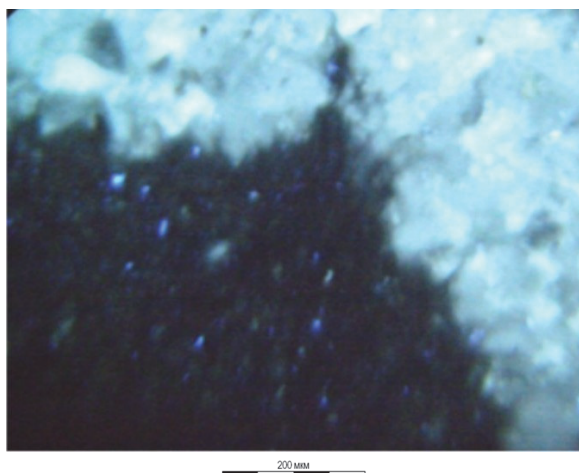


Рис. 4. Рваные контакты обособлений

Fig. 4. Torn contact of separations

Детальное изучение состава обломочного материала песчаников из обособлений, образующих конволюдную текстуру, и песчаников из ненарушенных слоев (кварцевых граувакк) свидетельствует о почти полной аналогии. Отличие заключается в количестве и составе цемента. Песчаники из обособлений характеризуются гидрослюдисто-кремнистым цементом, количество которого не превышает 10%. В песчаниках отсутствует битуминозное вещество. Контуры обособлений имеют рваные контакты с вмещающими породами (рис. 4). Похожие текстуры были обнаружены в оськинской свите верхнего девона в Минусинском прогибе и названы как «колобки подводного оползня» [9].

Условия формирования турнейских отложений (ярской толщи)

Полученные результаты гранулометрического анализа позволили построить генетические диаграммы Г.Ф. Рожкова [10] и Л.Б. Рухина [11]. Диаграмма Г.Ф. Рожкова «асимметрия-эксцесс» показывает, что обломочный материал песчаников верхней части ярской толщи осаждался в условиях крупного морского водоема с выходами волн на мелководье, мощными накатами, прибоем, где скорость динамической пересортировки превышала скорость привноса обломочного материала (поле VIII, рис. 5). Согласно динамогенетической диаграмме Л.Б. Рухина терригенный материал яркой толщи осаждался в условиях волнений, что подтверждается данными графика «асимметрия-эксцесс» и анализом макроскопического описания пород (рис. 6).

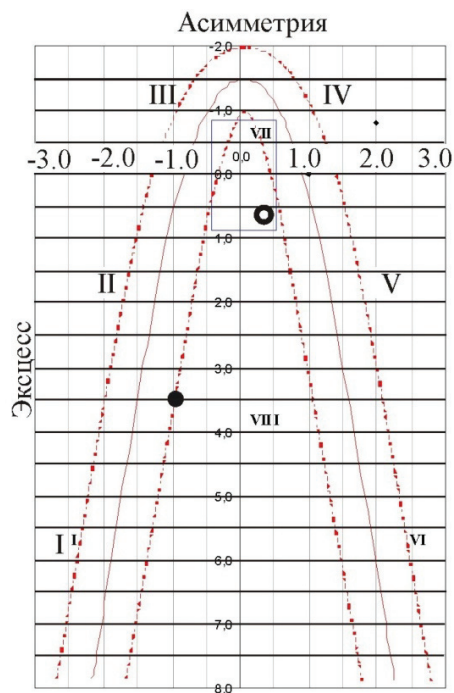
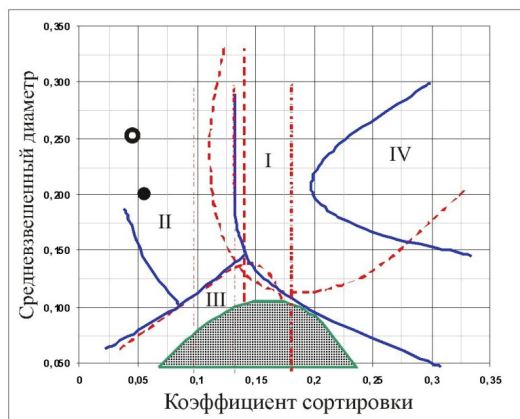


Рис. 5. Диаграмма Г.Ф. Рожкова «асимметрия-эксцесс» (слева)

Fig. 5. Chart of G.F. Rozhkov «skewness-kurtosis» (left)

Слабая сортировка осадка, незначительная зрелость минерального состава верхней части ярской толщи являются производными тектонических движений в турнейском веке в области седиментации. Ранее исследователями предполагался более поздний возраст [12]. Широко развитые конформные контакты свидетельствуют о позднекаратегнетических преобразованиях породы.



Условные обозначения

- Сводные данные по образцам из нарушенных слоев
- Сводные данные по образцам из ненарушенных слоев

Рис. 6. Динамогенетическая диаграмма Л.Б. Рухина (справа)

Fig. 6. Dynamogenesis chart of L.B. Rukhin (right)

Исследования верхней части ярской толщи турнейского возраста на основе расчета петрохи-

мических модулей [13, 14] позволили реконструировать особенности обстановок осадконакопления (таблица).

Комплексное изучение литологопетрографических, палеонтологических, литогеохимических особенностей турнейских отложений, представленных в Колывань-Томской складчатой зоне ярской толщей, позволило установить специфические условия их седиментации и преобразования.

Формирование отложений ярской толщи происходило в прибрежно-морских условиях, что было подтверждено петрографическими и геохимическими исследованиями [16].

Заключение

В турнейских отложениях, представленных в Колывань-Томской складчатой зоне ярской толщей, зафиксированы сейсмодислокации, о признаках которых свидетельствуют следы оползания пластичного осадка в пределы тонко терригенных прослоев, смещений осадка, кластические дайки, а также секущие поверхности, приводящие к нарушению нормальной последовательности слоев во время формирования верхней части толщи. Такое проявление палеосейсмичности в турнейском веке раннего карбона можно считать началом развития коллизии в Алтае-Саянском регионе [17], закончившейся в среднем карбоне присоединением к Сибирскому континенту.

Впервые в разрезе верхней части ярской толщи установлены сингенетично-битуминозные аргиллиты и миграционные битумоиды в прослоях песчаников и алевролитов.

Таблица. Петрохимические модули по Юдовичу и Катрис [15]

Table. Petrochemical modules by Yudovich and Katriss

| Рассчитываемый модуль Calculated module | Значение (весовой %) Value (weight %) | Обстановка осадконакопления Sedimentation environment |
|---|--|--|
| Гидролизатный/Gidrolizaty $GM=(Al_2O_3+TiO_2+Fe_2O_3+FeO+MnO)/SiO_2$ | 1,62 | Осадочная порода химически зрелая и мало подвергалась выветриванию, продукты гумидного выветривания Sedimentary rock is chemically mature and it had slightly subjected to weathering, products of humid weathering |
| Алюмокремниевый/Alumino $AM=Al_2O_3 \setminus SiO_2$ | 0,819 | Размыв гумидных кор выветривания Erosion of the weathering crusts |
| Титановый/Titanium TM= TiO_2/Al_2O_3 | 0,019 | Риолитовые туфы, глинистые породы Rhyolite tuff, clay rocks |
| Щелочной/Alkaline Na_2O/K_2O | 49,875 | Породы с натровым плагиоклазом, значительным количеством слюд и КПШ Rocks with sodic plagioclase, significant number of micas and K-feldspar |
| Общая нормативная щелочность Total normative alkalinity $HM+KM=(Na_2O+K_2O) \setminus Al_2O_3$ | 22 | Примеси вулканогенного материала основного состава Admixture of volcanogenic material of basic composition |
| Железный/Iron $JM=(FeO+Fe_2O_3+MnO) \setminus (Al_2O_3+TiO_2)$ | 0,953 | Повышенно-железистая терригенная порода Increased-ferruginous terrigenous rock |
| Fe\Mn | 94,282 | Осадочные породы мелководно-прибрежные Sedimentary shallow-coastal rocks |
| Индикатор восстановительных обстановок Restorative environment indicators $Fe_2O_3 \setminus FeO$ | 0,1135 | Обстановка восстановительная Restorative environment |

Текстурно-структурные особенности пород указывают на то, что битуминизация проходила до палеосейсмичности. Участки, подвергшиеся палеодислокациям, не содержат битуминозного вещества.

В краевых частях породных бассейнов среди терригенных разрезов, характеризующихся частым переслаиванием пластичных и относительно хрупких пород, неоднократно зафиксированы аналогичные кластические дайки, горизонты с включениями, «штокверковые» текстуры. Некоторые исследователи связывают появление таких текстур со сверхвысокими пластовыми давлениями на сопряжении с породами-коллекторами [18, 19]. В результате создаются гидроплывуны и гидроразрывы. При тектоническом взаимодействии участ-

ков с аномально высокими и аномально низкими давлениями возникают очаги мелкофокусных землетрясений [20].

Такие явления, очевидно, имели место и в Колывань-Томской складчатой зоне в турнейское время, но широкий масштаб их проявления приводит к выводам о том, что тектонические преобразования региона были определяющими. Это подтверждается степенью катагенетических преобразований терригенных пород верхней части ярской толщи, ассоциациями аутигенных минералов и широким развитием структур дифференциального скольжения [21] и кливажа. Зоны разуплотнения и трещиноватости являлись проводниками для миграции и накопления битуминозного вещества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геологическое строение области сопряжения Кузнецкого Алатау и Колывань-Томской складчатой зоны / В.А. Врублевский, М.П. Нагорский, А.Ф. Рубцов, Ю.Ю. Эрвье. – Томск: Изд-во Томского университета, 1987. – 94 с.
2. Легенда Обской подсерии Западно-Сибирской серии листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200 000 / гл. ред. А.Е. Бабушкин. – Томск, 2000. – 61 с.
3. Гудымович С.С., Рычкова И.В., Рябчикова Э.Д. Геологическое строение окрестностей г. Томска. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 84 с.
4. Шнип О.А. Состав, строение и проблемы нефтегазоносности фундамента. Западная Сибирь, Средняя Азия, Зондский шельф: автореф. дис. ... д-ра. геол.-минер. наук. – М., 1998. – 15 с.
5. Шванов В.Н. Песчаные породы и методы их изучения. – Л.: Недра, 1969. – 248 с.
6. Япаскурт О.В. Новое о типизации постседиментационных преобразований терригенных отложений континентов и их окраин (с учетом влияния геодинамических факторов на литогенез) // Вестник Моск. ун-та. Серия «Геология». – 2014. – № 4. – С. 42–49.
7. Кудаярова А.Р. Седиментационные и петрофизические модели продуктивного пласта СТкз1 залежи Волковского месторождения // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 12. – С. 95–97.
8. Преснякова О.В. Сланцевая нефть доминикитов – что это? URL: <http://www.tatnipi.ru/upload/sms/2014/geol/012.pdf>
9. Зорин В.Т. Нижний карбон Минусинского прогиба (стратиграфия и флора). – СПб., 1998. – 144 с.
10. Рожков Г.Ф. Литология. Т. 2. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 432 с.
11. Рухин Л.Б. Основы литологии. – Л.: Недра, 1969. – 703 с.
12. Котельников А.Д., Максиков С.В., Никонов Ю.Н. Особенности тектонического строения палеозойских отложений между речья Оби и Томи (Томская область). Проблемы и перспективы развития минерально-сырьевого комплекса и производитель-
- ных сил Томской области: материалы научно-практической конференции. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2004. – С. 90–92.
13. Панова Е.Г., Шишлов С.Б. Структурно-генетический анализ осадочных формаций. – СПб.: С.-Петерб. гос. ун-т, 2013. – 152 с.
14. Интерпретация геохимических данных. Т. 1. / под ред. Е.В. Склярова. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 226 с.
15. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). – Сыктывкар: Геопринт, 2011. – 742 с.
16. Минералогия области сочленения Салаира и Колывань-Томской складчатой зоны / Н.А. Росляков, Ю.Г. Щербаков, Л.В. Алабин и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001. – 243 с.
17. Роль сдвигов в позднепалеозойско-раннемезозойской тектонике и геодинамике Алтае-Саянской и Восточно-Казахстанской складчатых областей / М.М. Буслов, Т. Ватанабе, Л.В. Смирнова, И. Фудживара, К. Ивата, И. де Граве, Н.Н. Семаков, А.В. Травин, А.П. Кирьянова, Д.А. Кох // Геология и геофизика. – 2003. – № 1–2. – С. 49–75.
18. Холодов В.Н. Термобарические обстановки глубин осадочно-породных бассейнов и их флюидодинамика // Эволюция осадочных процессов в истории Земли: материалы VIII Всероссийского литологического совещания. – М., 2015. – С. 10–12.
19. Кочнева О.Е., Седунова А.П. Влияние геологической неоднородности коллекторов фаменско-турнейского пласта на процесс извлечения нефти Ульвинского месторождения // Вестник Пермского ун-та. Серия «Геология». – 2013. – Вып. 2 (19). – С. 87–94.
20. Лисицын А.П. Современное представление об осадкообразовании Земли. Мировой океан. – М.: Научный мир, 2014. – Т. 2. – С. 331–353.
21. Япаскурт О.В. Литогенез и полезные ископаемые миеогеосинклиналей. – М.: Недра, 1992. – 224 с.

Поступила 08.02.2016 г.

Информация об авторах

Шамина М.И., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры общей геологии и землеустройства Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Поцелуев А.А., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры общей геологии и землеустройства Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Рычкова И.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры общей геологии и землеустройства Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Корчуганов Я.Ю., студент Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 552.54:551.73(571.1)

NEW DATA ON SPECIFIC CONDITIONS OF FORMATION OF TOURNAISIAN DEPOSITS OF KOLYVAN-TOMSK FOLDED ZONE

Marina I. Shaminova¹,

mshaminova@mail.ru

Anatoly A. Potseluev¹,

poceluevaa@ignd.tpu.ru

Irina V. Rychkova¹,

irina.rychkova@mail.ru

Yakov Yu. Korchuganov¹,

ya.korchuganov@mail.ru

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

The relevance of the research is caused by the necessity to explain the influence of paleoseismicity on catagenetic transformations of terrigenous deposits of tournaisian age, represented by Yarskaya formation in Kolyvan-Tomsk folded zone, due to its petroleum potential. The solution of this issue can affect significantly the assessment of petroleum potential of the deep horizons of the West Siberian plate.

The main aim of the research is to determine the features of sedimentation and transformation of tournaisian deposits within the Kolyvan-Tomsk folded zone (near Tomsk) under the influence of dislocations.

The methods used in the study: lithological-and-petrographic (particle size distribution, classification of rocks using the chart of V.D. Shvanov, as well as the analysis of authigenic mineral formation), paleontological, lithogeochemical (X-ray diffraction and calculations petrochemical modules on Ya.E. Yudovich and M.P. Katriss). The fluorescent microscopic method was used to study the bituminosity occurrence.

The results. The complex approach to the study of tournaisian deposits of the Kolyvan-Tomsk folded zone, represented by Yarskaya formation, allowed the authors to set the specific conditions of their sedimentation and transformation. The deposits of Yarskaya strata were formed in coastal environments. Among the terrigenous deposits the authors determined the signs of seismic dislocations. The signs are indicated by the traces of plastic sludge slumping into thin terrigenous interlayers, sediment displacements, clastic dikes and cross-cut surfaces, leading to disruption of the normal sequence of layers during strata formation. Terrigenous sediments of Yarskaya strata are characterized by frequent interlayering of plastic and relatively fragile rocks which contain the horizons with «stockwork» textures. For the first time in the top of Yarskaya strata of tournaisian age the syngenetic-bituminous mudstones and migration bitumens were established. Bituminization lasted till the paleoseismicity.

Key words:

Kolyvan-Tomsk folded zone, Yarskaya formation, tournaisian deposits, paleoseismicity, seismic dislocations, «stockwork» texture, bituminosity.

REFERENCES

- Vrublevsky V.A., Nagorsky M.P., Rubtsov A.F., Eryve Yu.Yu. *Geologicheskoe stroenie oblasti sopryazheniya Kuznetskogo Alatau i Kolyvan-Tomskoy skladchatoi zony* [Geological structure of conjugation area of Kuznetsk Alatau and Kolyvan-Tomsk folded zone]. Tomsk, Tomsk University Press, 1987. 94 p.
- Legenda Obskoy podserii Zapadno-Sibirskoy serii listov Gosudarstvennoy geologicheskoy karty Rossiyskoy federatsii mashtaba 1:200000* [The legend of the Ob of sub-series of the West Siberian series of sheets of State geological map of the Russian Federation, Scale 1:200000]. Chief ed. A.E. Babushkin. Tomsk, 2000. 61 p.
- Gudymovich S.S., Rychkova I.V., Ryabchikova E.D. *Geologicheskoe stroenie okrestnostey g. Tomsk* [Geology of the environs of Tomsk]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2009. 84 p.
- Shnip O.A. *Sostav, stroenie i problem neftegazonosnosti fundamenta. Zapadnaya Sibir, Srednyaya Aziya, Zondskiy shelf. Avtoref. Dis. Doktora nauk* [Composition, structure and problems of the petroleum potential of the Foundation. Western Siberia, Central Asia, the Sunda shelf. Dr. Dis. Abstract]. Moscow, 1998. 15 p.
- Shvanov V.N. *Peschanye porody i metody ikh izucheniya* [Sandy rocks and methods of their study]. Leningrad, Nedra Publ., 1969. 248 p.
- Yapaskurt O.V. New things on typing post-sedimentary transformations of terrigenous sediments of the continents and their margins (taking into account the influence of geodynamic factors on lithogenesis). *Moscow University Geology Bulletin*, 2014, no. 4, pp. 42–49. In Rus.
- Kudayarova A.R. Sedimentary and petrophysical models of the productive formation СТкз1 of Volkovskoe field deposit. *Oil industry*, 2013, no. 12, pp. 95–97. In Rus.
- Presnyakova O.V. *Slantsevaya neft dominikitov – chto eto?* [Shale oil dominikanow – what is it?] Available at: <http://www.tatni-pi.ru/upload/sms/2014/geol/012.pdf> 8 (accessed 7 February 2016).
- Zorin V.T. *Nizhniy karbon Minusinskogo progiba (stratigrafiya i flora)* [Lower Carboniferous of the Minusinsk trough (stratigraphy and flora)]. St-Petersburg, 1998. 144 p.
- Rozhkov G.F. *Litologia* [Lithology]. Vol. 2. Moscow, MGU Press, 1993. 432 p.
- Rukhin L.B. *Osnovy litologii* [Fundamentals of lithology]. Leningrad, Nedra Publ., 1969. 703 p.

12. Kotelnikov A.D., Maksikov S.V., Nikonov Yu. N. Osobennosti tektonicheskogo stroeniya paleozoyskikh otlozheniy mezhdurechya Obi i Tomi (Tomskoy oblast) [Features of tectonic structure of the Paleozoic sediments between the rivers Ob and Tom (Tomsk region)]. *Problemy i perspektivy razvitiya mineralno-syrevoogo kompleksa i proizvoditelnykh sil Tomskoy oblasti. Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proc. of scientific-practical conference. Problems and prospects of development of mineral resources sector and productive forces in Tomsk region]. Novosibirsk, SNIIGGiMS Press, 2004. pp. 90–92.
13. Panova E.G., Shishlov S.B. *Strukturno-geneticheskiy analiz osadochnykh formatsiy* [Structural and genetic analysis of sedimentary formations]. St-Petersburg, St. Petersburg state University Press, 2013. 152 p.
14. *Interpretatsiya geokhimicheskikh dannykh* [Interpretation of geochemical data]. Ed. by E.V. Sklyarov. Moscow, Internet Engineering Publ., 2001. Vol. 1, 226 p.
15. Yudovich Ya.E., Katris M.P. *Geokhimicheskie indikatory litogeneza (litologicheskaya geokhimiya)* [Geochemical indicators of lithogenesis (lithological geochemistry)]. Syktyvkar, Geoprint Publ., 2011. 742 p.
16. Roslyakov N.A., Shcherbakov Yu.G., Alabin L.V. *Minerageniya oblasti sochleneniya Salaira i Kolyvan-Tomskoy skladchatoy zony* [Minerageny of the juncture of the Salair and Kolyvan-Tomsk folded zone]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2001. 243 p.
17. Buslov M.M., Watanabe T., Smirnova L.V., Fujiwara I., Iwata K., I. de Grave, Semakov N.N., Travin A.V., Kiryanov A.P., Kokh A. Role of shifts in late Paleozoic – early Mesozoic tectonics and geodynamics of the Altai-Sayan and East Kazakhstan folded areas. *Geology and Geophysics*, 2003, no. 1–2, pp. 49–75. In Rus.
18. Kholodov V.N. Termobaricheskie ustanovki glubin osadochnopородnykh basseynov i ikh flyuidodinamika [Temperature and pressure conditions of the deep sedimentary basins and their fluid dynamics]. *Evolutsiya osadochnykh protsessov v istorii Zemli. Materialy VIII Vserossiyskogo litologicheskogo soveshchaniya* [Evolution of sedimentary processes in Earth history. Proc. of the VIII All-Russian lithological meeting]. Moscow, 2015. pp. 10–12.
19. Kochneva O.E., Sedunova A.P. Influence of reservoir geological heterogeneity of Famennian-tournaisian reservoir on oil extraction in Ulvinskoe deposits. *Bulletin of Perm state University. Geology*, 2013, vol. 2 (19), pp. 87–94. In Rus.
20. Lisitsyn A.P. *Sovremennoe predstavlenie ob osadkoobrazovanii Zemli. Mirovoy okean* [Modern idea on the Earth sedimentation. World ocean]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2014. Vol. 2, pp. 331–353.
21. Yapaskurt O.V. *Litogenez i poleznye iskopaemye miogeosinklinaley* [Lithogenesis and mineral resources of miogeosynclinal]. Moscow, Nedra Publ., 1992. 224 p.

Received: 8 February 2016.

Information about the authors

Marina I. Shaminova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Anatoly A. Potseluev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Irina V. Rychkova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Yakov Yu. Korchuganov, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 553.98

ЭКСПРЕСС-РАЙОНИРОВАНИЕ МАТЕРИНСКОЙ СВИТЫ ПО ПЛОТНОСТИ РЕСУРСОВ ГЕНЕРИРОВАННОЙ НЕФТИ (НА ПРИМЕРЕ НЮРОЛЬСКОЙ МЕГАВПАДИНЫ)

Исаев Валерий Иванович¹,

isaevvi@tpu.ru

Исаева Ольга Степановна²,

isaeva_sah@mail.ru

Лобова Галина Анатольевна¹,

lobovaga@tpu.ru

Старостенко Виталий Иванович³,

vstar@igph.kiev.ua

Фомин Александр Николаевич⁴,

fominan@ipgg.sbras.ru

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

² Томский филиал ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по Сибирскому федеральному округу», Россия, 634034, г. Томск, ул. Мокрушина, 9, стр. 16.

³ Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Украина, 03142, г. Киев, пр. Палладина, 32.

⁴ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3.

Актуальность исследований обусловлена необходимостью разработки критериев и совершенствования технологий оценки трудноизвлекаемых запасов сланцевой нефти (аккумулированной *in situ*) баженовской свиты Западно-Сибирской нефтегазодносной провинции.

Цель исследований: определить методологию, комплекс исходных геолого-геофизических данных и продемонстрировать технологию зонального районирования нефтематеринских отложений по плотности ресурсов сланцевой нефти.

Объект исследований: верхнеюрские баженовские нефтематеринские отложения мезозойско-кайнозойского разреза, вскрытого глубокими скважинами на юго-востоке Западной Сибири.

Методология и технология исследований. Принято, что ключевым фактором, детализирующим характеристику материнской свиты как питающей выше/ниже лежащие терригенные резервуары, или как сланцевую формацию, являются время действия и температурный режим главной фазы нефтеобразования (Н.Б. Вассоевич, 1967), а основные объемы нефти, генерированной, аккумулятивной *in situ* или эмигрированной в коллектор, локализируются там, где материнские отложения в большей степени находятся/находились в главной зоне нефтеобразования (А.Э. Конторович и др., 1967). Технология зонального районирования базируется на методе палеотемпературного моделирования, позволяющего реконструировать термическую историю материнских отложений, выделить по геотемпературному критерию и закартировать очаги генерации нефтей. Оценка ресурсов генерированных нефтей определяется интегральным показателем, напрямую зависящим от времени нахождения материнской свиты в главной зоне нефтеобразования и от ее геотемператур.

Результаты исследований. Продемонстрирована технология зонального районирования Нюрольской мегавпадины и структура ее обрамления, базирующаяся на методе палеотемпературного моделирования, который органически вписывается в методологию учения о главной фазе нефтеобразования и пороговых температурах вхождения материнских отложений в главную зону нефтеобразования. Определены перспективные зоны и участки на сланцевую (аккумулированную *in situ*) баженовскую нефть. Состоятельность районирования уверенно аргументируется нефтепроявлениями и притоками нефти в глубоких скважинах из интервалов материнских пород.

Ключевые слова:

Баженовская свита, сланцевая нефть, палеотемпературное моделирование, ресурсы, районирование Нюрольской мегавпадины.

Введение

В последние 5 лет фиксируется тренд снижения добычи нефти в основном нефтедобывающем регионе РФ – Западно-Сибирском. Поэтому обращено внимание на залежи нефти непосредственно в баженовской нефтематеринской свите (нефти, аккумулятивной *in situ*, в англоязычной терминологии –

«сланцевой нефти», «shale oil») как на источник существенного улучшения сырьевой базы, с предварительной оценкой запасов в десятки–сотни млрд т. По оценкам, сделанным для «нормальных разрезов (НР)» баженовской свиты центральной части Западной Сибири, доля остаточной нефти (аккумулятивной *in situ*) составляет от 15 до 20 % [1].

Согласно новейшим данным ИНГТ СО РАН, в пределах распространения баженовской свиты содержится 150–500 млрд т геологических ресурсов нефти, с предварительной оценкой извлекаемых ресурсов в объеме 18–60 млрд т [2]. Здесь же отметим, что проблема поисков и освоения сланцевой нефти баженовской свиты Западной Сибири уже перешла в практическую плоскость экономики разработки месторождений [3].

На сегодняшний день на юго-востоке Западной Сибири две нефтедобывающие компании Томской области, получившие притоки нефти из пласта Ю₀, поставили на государственный баланс перспективные запасы нефти по баженовской свите. Это ООО

«Томская нефть» – Федюшкинское нефтяное месторождение, Нюрольская мегавпадина и ООО «Норд Империл» – Снежное нефтегазоконденсатное месторождение, Усть-Тымская мегавпадина.

Очевидно, что на этапе зональной оценки перспектив конкретных нефтегазоносных комплексов (НГК) необходимо выполнить районирование нефтематеринских свит территории с точки зрения ранжирования поисковых зон и площадей по плотности ресурсов генерированных нефтей. Ключевым фактором, детализирующим характеристику материнской свиты как питающей выше/ниже лежащие НГК или как сланцевой формации, являются время действия и температурный режим

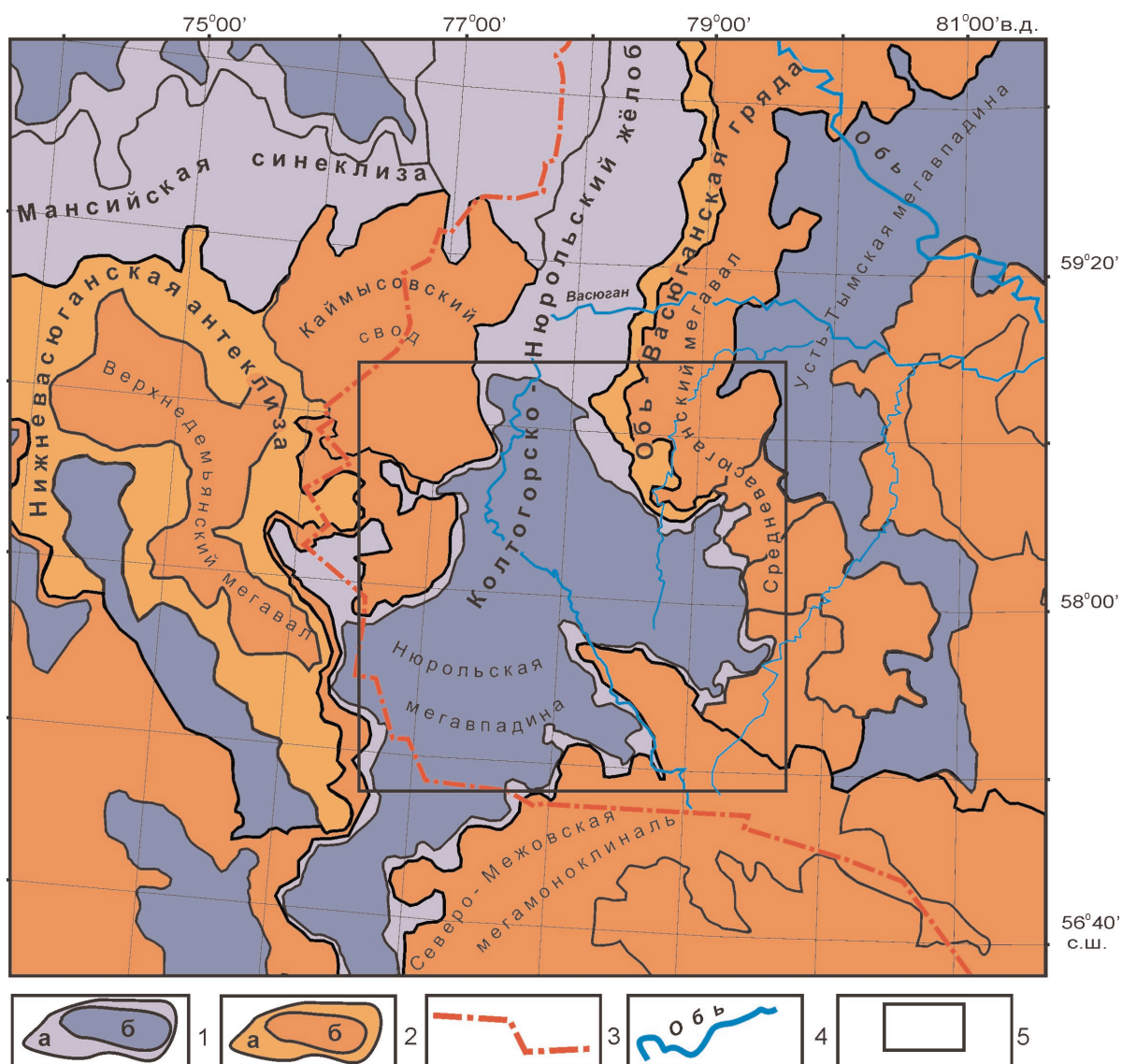


Рис. 1. Обзорная схема территории исследований (на основе тектонической карты юрского структурного яруса [11]). Тектонические элементы: 1 – отрицательные надпорядковые (а), I порядка (б); 2 – положительные надпорядковые (а), I порядка (б); 3 – граница Томской области; 4 – основные реки; 5 – контур территории районирования

Fig. 1. Scheme of the study area (based on the tectonic map of Jurassic structural stage [11]). Tectonic elements: 1 – negative Superordinacy (a), the first order (b); 2 – positive Superordinacy (a), the first order (b); 3 – border of Tomsk region; 4 – the main river; 5 – contour of zoning area

главной фазы нефтеобразования [4], нефтяного окна [5]. Иначе говоря, основные объемы нефти, генерированной, аккумулятивной, или мигрировавшей в коллектор, локализируются там, где материнские отложения в большей степени находятся/находились в главной зоне нефтеобразования [6].

Ниже характеризуется технология районирования Нюрольской мегавпадины и структур ее обрамления (рис. 1), базирующаяся на методе палеотемпературного моделирования, который органически вписывается в методологию учения о главной фазе нефтеобразования (ГФН) и пороговых температурах вхождения материнских отложений в главную зону нефтеобразования (ГЗН).

Схематическая карта зонального районирования Нюрольской мегавпадины по плотности ресурсов баженовской сланцевой нефти может быть уточнена и детализирована при учете толщин и текстуры материнских отложений, концентраций и молекулярного состава рассеянного органического вещества (РОВ) [7].

О методике районирования

Восстановление термической истории материнских отложений выполняется на основе палеотектонических и палеотемпературных реконструкций. Применен метод палеотемпературного моделирования, основанный на численном решении уравнения теплопроводности горизонтально-слоистого твердого тела с подвижной верхней границей [8–10]. В математическую модель непосредственно включены климатический вековой ход температуры на земной поверхности, как краевое условие, и палеотемпературы из определений отражательной способности витринита (ОСВ), как «наблюдаемые».

В модели процесс распространения тепла в осадочной толще описывается начально-краевой задачей для уравнения

$$\frac{\lambda}{a} \cdot \frac{\partial U}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial Z} \left(\lambda \frac{\partial U}{\partial Z} \right) = f, \quad (1)$$

где λ – теплопроводность; a – температуропроводность; f – плотность тепловыделения внутренних (радиоактивных) источников тепла; U – температура; Z – расстояние от основания осадочного разреза; t – время.

Краевые условия уравнения (1):

$$U|_{Z=\varepsilon} = U(t), \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial U}{\partial Z} \Big|_{Z=0} = q(t), \quad (3)$$

где $q(t)$ – тепловой поток из основания осадочного разреза; $\varepsilon=\varepsilon(t)$ – верхняя граница осадочной толщи (поверхность осадконакопления, дневная поверхность). Отсюда видно, что палеотектонические реконструкции непосредственно сопряжены с палеотемпературными реконструкциями.

Параметрически осадочная толща описывается мощностями стратиграфических комплексов h_i , для каждого из которых заданы теплопроводность λ_i , температуропроводность a_i , плотность тепловыделения радиоактивных источников f_i в породах и время осадконакопления t_i (рис. 2). Скорость осадконакопления v_i может быть нулевой и отрицательной, что позволяет учитывать перерывы осадконакопления и денудацию.

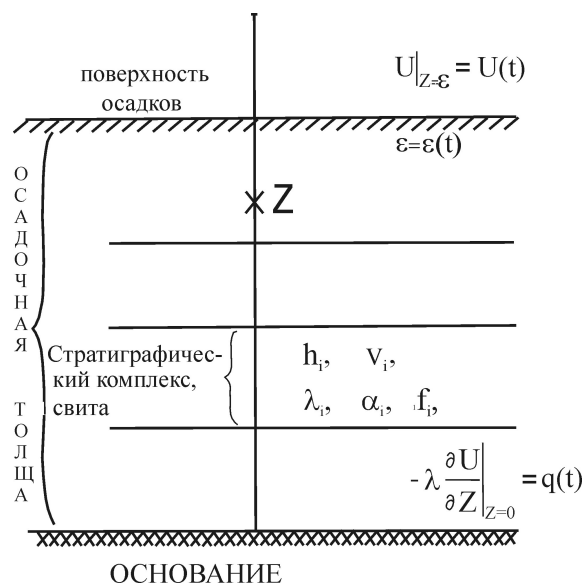


Рис. 2. Схематическое изображение слоистого осадочного разреза при палеотемпературном моделировании (пояснения в тексте)

Fig. 2. Schematic representation of the layered sedimentary section at paleotemperature modeling (the notes are given in the text)

Объектом палеотемпературного моделирования является осадочный разрез представительной глубокой скважины. Такие скважины выбираются по следующим критериям, выполняемым одновременно: 1) наличие замеров пластовых температур, используемых в качестве «наблюдаемых» для палеотемпературного моделирования; 2) наличие ощутимых притоков флюида при испытании пластов, что повышает достоверность пластовых температур; 3) наличие определений максимальных геотемператур по ОСВ, используемых в качестве «наблюдаемых», что существенно повышает достоверность результатов палеотемпературного моделирования; 4) достаточно равномерное распределение скважин по территории исследования, что является важным условием корректности последующей интерполяции при построении прогнозных карт. По известным причинам, таких скважин немного.

Параметризация осадочного разреза, вскрытого скважиной, определяющая параметры седиментационной и теплофизической модели (1)–(3), принимается в соответствии со стратиграфической разбивкой скважины по первичному «Делу скважины»

и «Каталогу литолого-стратиграфических разбивок скважин» (табл. 1). Возраст пород и соответствующие вековые интервалы шкалы геологического времени [12], увязанные с периодами геохронологической шкалы Стратиграфического кодекса (1992 г.), определяют время и скорость осадконакопления.

Таблица 1. Пример параметрического описания седиментационной истории и теплофизических свойств осадочной толщи, вскрытой скважиной Северо-Фестивальная 1, Нурольская мегавпадина (рис. 3, а, условный индекс СФ-1)

Table 1. Example of a parametric description of sedimentation history and thermal properties of sedimentary formation penetrated by the borehole Severo-Festivalnaya 1, Nurolrka megadepression (Fig. 3, a, conditional index СФ-1)

| Свита, толща (стратиграфия) Suite, strata (stratigraphy) | Мощность, м Thickness, m | Возраст, млн лет назад Age, million years ago | Время накопления, млн лет Accumulation time, mil years | Плотность, г/см ³ Density, g / cm ³ | Теплопроводность, Вт/м·град Thermal conductivity, W/m·deg | Температуропроводность, м ² /с Thermal diffusivity, m ² /s | Тепловыделение, Вт/м ³ Heat generation, W/m ³ |
|---|-----------------------------|--|---|--|--|---|--|
| Четвертичные Q Quaternary | 35 | 1,64–0 | 1,64 | 2,02 | 1,27 | 6,5e–007 | 1,1e–006 |
| Плиоценовые N ₂ Pliocene | – | 1,64–4,71 | 3,07 | – | – | – | – |
| Миоценовые N ₁ Miocene | – | 4,71–24,0 | 19,29 | – | – | – | – |
| Некрасовская nk Pg ₃ Nekrasovskaya | 154 | 24,0–32,3 | 8,3 | 2,09 | 1,35 | 7e–007 | 1,2e–006 |
| Чеганская hg Pg ₃₋₂ Cheganskaya | 70 | 32,3–41,7 | 9,4 | 2,09 | 1,35 | 7e–007 | 1,2e–006 |
| Люлинворская ll Pg ₂ Lyulinvorskaya | 240 | 41,7–54,8 | 13,1 | 2,09 | 1,35 | 7e–007 | 1,2e–006 |
| Талицкая tl Pg ₁ Talitskaya | 70 | 54,8–61,7 | 6,9 | 2,09 | 1,35 | 7e–007 | 1,2e–006 |
| Ганькинская gn Pg _{1-K₂} Gankinskaya | 170 | 61,7–73,2 | 11,5 | 2,11 | 1,37 | 7e–007 | 1,25e–006 |
| Славгородская sl K ₂ Slavgorodskaya | 130 | 73,2–86,5 | 13,3 | 2,11 | 1,37 | 7e–007 | 1,25e–006 |
| Ипатовская ip K ₂ Ipatovskaya | – | 86,5–89,8 | 3,3 | – | – | – | – |
| Кузнецовская kz K ₂ Kuznetsovskaya | 15 | 89,8–91,6 | 1,8 | 2,18 | 1,43 | 8e–007 | 1,25e–006 |
| Покурская pk K ₁₋₂ Pokurskaya | 800 | 91,6–114,1 | 22,5 | 2,26 | 1,49 | 8e–007 | 1,25e–006 |
| Алымская a ₂ K ₁ Alymskaya | 24 | 114,1–116,3 | 2,2 | 2,39 | 1,6 | 8e–007 | 1,25e–006 |
| Алымская a ₁ K ₁ Alymskaya | 17 | 116,3–120,2 | 3,9 | 2,39 | 1,6 | 8e–007 | 1,25e–006 |
| Киялинская kls K ₁ Kiyalinskaya | 613 | 120,2–132,4 | 12,2 | 2,39 | 1,6 | 8e–007 | 1,25e–006 |
| Тарская tr K ₁ Tarskaya | 54 | 132,4–136,1 | 3,7 | 2,44 | 1,62 | 8e–007 | 1,25e–006 |
| Куломзинская klmK ₁ Kulomzinskaya | 313 | 136,1–145,8 | 9,7 | 2,44 | 1,64 | 8e–007 | 1,25e–006 |
| Баженовская bg J ₃ Bazhenovskaya | 23 | 145,8–151,2 | 5,4 | 2,42 | 1,62 | 8e–007 | 1,3e–006 |
| Георгиевская gr J ₃ Georgievskaya | 5 | 151,2–156,6 | 5,4 | 2,42 | 1,62 | 8e–007 | 1,3e–006 |
| Васюганская vs J ₃ Vasyuganskaya | 70 | 156,6–162,9 | 6,3 | 2,42 | 1,6 | 8e–007 | 1,3e–006 |
| Тюменская tm J ₁₋₂ Tyumenskaya | 362 | 162,9–200,8 | 37,9 | 2,46 | 1,64 | 8e–007 | 1,3e–006 |
| Тогурская tg J ₁ Togurskaya | 30 | 200,8–203,9 | 3,1 | 2,46 | 1,64 | 8e–007 | 1,3e–006 |
| Урманская ur J ₁ Urmanskaya | 39 | 203,9–208,0 | 4,1 | 2,46 | 1,64 | 8e–007 | 1,3e–006 |

Примечание. Заливкой показаны времена накопления тогурской и баженовской нефтематеринских свит и их параметрическое описание.

Note. Time of accumulation of Togur and Bazhenov oil source suites and their parametric description are showed in filling.

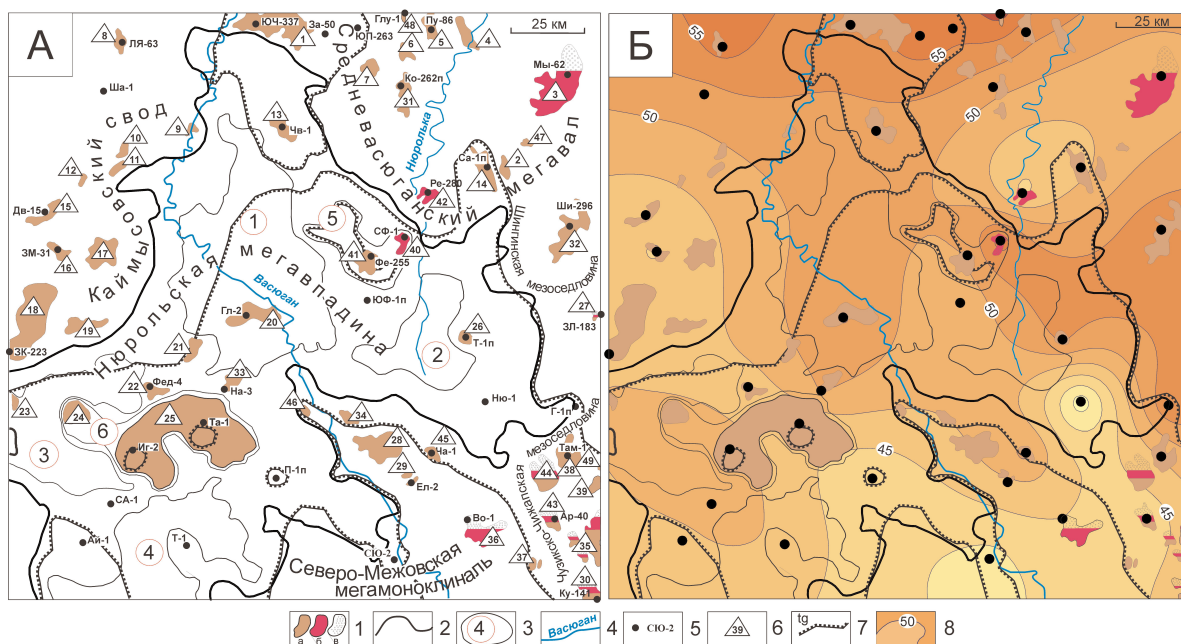


Рис. 3. Схематические карты нефтегазоносности (а) на тектонической основе [11] и распределения значений плотности теплового потока из основания (б) Нюрольской мегавпадины: 1 – месторождения: а – нефтяное, б – конденсатное, в – газовое; 2 – граница Нюрольской мегавпадины; 3 – структура III порядка и ее номер; 4 – речная сеть; 5 – исследуемая скважина (палеотемпературное моделирование) и ее условный индекс; 6 – условный номер месторождения; 7 – граница зоны распространения тогурской свиты; 8 – изолинии значений расчетной плотности теплового потока из основания осадочного чехла, мВт/м². Структуры III порядка: 1 – Кулан-Игайская впадина, 2 – Тамрадская впадина, 3 – Осево́й прогиб, 4 – Тамянский прогиб; 5 – Фестивальный вал, 6 – Игольско-Таловое куполовидное поднятие

Fig. 3. Schemes of oil and gas content (a) on tectonic basis [11] and distribution of heat flow density values from the sedimentary section base (b) of Nyurolrka megadepression: 1 – fields: a) oil; b) gas-and-condensate; c) gas; 2 – the boundary of Nyurolrka megadepression; 3 – structure of the III order and its number; 4 – river network; 5 – tested well (paleotemperature modeling) and its conditional index; 6 – conditional number of the field; 7 – boundary of Togur suite; 8 – isolines of values of heat flow calculated density from the base of the sedimentary cover, mW/m². Structures of the III order: 1 – Kulan-Igayskaya depression; 2 – Tamradskaya depression; 3 – Osevoy trough; 4 – Tamyansky trough; 5 – Festivalny arch; 6 – Igolsko-Talovoe doming

Литология и плотность пород выделенных свит и толщ принимается по материалам обобщения петрофизических определений керн и каротажа.

При отсутствии экспериментальных определений теплопроводности λ_i используются петрофизические зависимости теплопроводности осадков от их плотности σ [13]. Коэффициенты температуропроводности a_i , плотности тепловыделения радиоактивных источников f_i также определяются литологией стратиграфических комплексов.

Краевое условие (2) определяется температурой поверхности осадконакопления, т. е. соляным источником тепла, и задается в виде кусочно-линейной функции «местного» векового хода температур на поверхности Земли [14].

Задача решается в предположении квазипостоянства значения плотности теплового потока из основания осадочного чехла Западной Сибири, начиная с юрского времени [15]. Решение обратной задачи (расчет плотности глубинного теплового потока q) определяется из условия

$$\sum_{i=1}^{k_i} (U(Z_i, t, q) - T_i)^2 \xrightarrow{q} \min, \quad (4)$$

где T_i – «наблюдаемые» значения температур в k_i -точках на различных глубинах Z_i в моменты времени $t = \tau$. Решение обратной задачи (4) строится с учетом того, что функция $U(Z, t, q)$, являющаяся решением прямой задачи (1) с краевыми условиями (2) и (3), в этом случае линейно зависит от q . Поэтому неизвестный параметр q определяется однозначно. Важно отметить, что модель (1)–(4) не требует априорных сведений о природе и величинах глубинного теплового потока q .

Для решения обратной задачи геотермии в качестве «наблюдаемых» используются как измерения пластовых температур, полученные при испытаниях скважин ($\tau=0$), так и палеотемпературы ($\tau \neq 0$), определенные по ОСВ. Для перехода от ОСВ (R_{vt}^0) к соответствующей геотемпературе используется диаграмма «Линии значений отражательной способности витринита, нанесенные на измененную схему Коннона» [16]. На диаграмме зафиксированы линия соответствия $R_{vt}^0=0,5\%$ и температуры 80 °С, линия соответствия $R_{vt}^0=0,8\%$ и температуры 120 °С. При определениях температуры для промежуточных значений R_{vt}^0 выполняется линейная интерполяция между указанными крайними значениями [10].

Расчет палеотемператур состоит из двух этапов. На первом, по распределению температур T_i , «наблюденных» в *любых* точках разреза скважины, рассчитывается тепловой поток q через поверхность основания осадочного чехла, т. е. решается обратная задача геотермии. На втором этапе, с известным значением q , решаются прямые задачи геотермии – непосредственно рассчитываются температуры U в заданных точках осадочной толщи Z (в материнских свитах) на заданные *любые* моменты геологического времени t .

Основным критерием адекватности и предпочтительности результатов палеотемпературного моделирования выступает оптимальная согласованность («невязка») максимума расчетных геотемператур с «наблюденными» температурами «максимального палеотермометра» – с температурами, определенными по ОСВ. В той же степени важна оптимальная «невязка» расчетных геотемператур и с «наблюденными» пластовыми температурами. Оптимальная «невязка» – это средняя квадратичная разность расчетных и наблюдаемых значений, равная погрешности наблюдений [17]. Эта погрешность порядка $\pm 2^\circ\text{C}$. В качестве второго основного критерия адекватности и предпочтительности результатов принята степень согласованности очагов генерации углеводородов (УВ), выделяемых по геотемпературному критерию, с установленной геологоразведкой нефтегазоносностью недр.

Решение прямых задач геотермии выполняется на ключевые моменты геологического времени, соответствующие временам начала/завершения формирования каждой свиты, перекрывающей материнскую. Балансовая модель процессов нефтегазообразования [18] позволяет по геотемпературному критерию выполнить выделение очагов интенсивного образования нефтей из РОВ материнских отложений: с 85°C – вхождение в ГЗН материнских пород (аквагенное РОВ), с 95°C – террагенное РОВ.

Далее для материнской свиты рассчитывается интегральный показатель плотности ресурсов генерированных нефтей (R , усл. ед.) по формуле [19, 20]

$$R = \sum_{i=1}^n (U_i t_i \cdot 10^{-2}), \quad (5)$$

где U_i – расчетная геотемпература очага генерации нефти, $^\circ\text{C}$; t_i – интервальное время действия очага – нахождения материнских отложений в ГЗН, млн лет; количество временных интервалов n определено числом интервалов геологического времени нахождения материнских отложений в ГЗН. Как следует из (5), расчетное значение плотности генерированных ресурсов (на участке скважины) напрямую зависит от времени нахождения материнской свиты в ГЗН и от геотемператур ГЗН. В данном случае плотность генерированных ресурсов имеет размерность $[\text{C}\cdot\text{млн л}]$. Эту единицу оценки мы называем условной.

Применяемый подход оценки ресурсов УВ позволяет кумулятивно учитывать динамику геотем-

ператур материнских отложений. Вместе с тем известно, что генерация УВ происходит тогда, когда текущее значение свободной энергии превышает значение энергии активации – прочность связи керогена. А последнее обеспечивается в первую очередь за счет прироста температуры [21, 22]. Такой подход к оценке плотности генерированных ресурсов позволяет достаточно просто определить пространственно-временную локализацию очагов генерации УВ. Оценка плотности ресурсов выполняется в условных единицах, что представляется корректным для последующего площадного районирования.

Характеристика нефтегазоносности и теплового поля Нюрольской мегавпадины

Нефтегазоносные комплексы и месторождения. Продуктивными комплексами являются меловой, верхнеюрский, среднеюрский, нижнеюрский и палеозойский. На территории открыто 49 месторождений УВ (рис. 3, а, табл. 2).

Для средне-, нижнеюрского и палеозойского НГК нефтематеринской является *тогурская свита* (J_{1t_1}) с РОВ гумусового и смешанного типов [23]. Отложения свиты выклиниваются на положительных структурах, над выступами кристаллического фундамента.

В *палеозойском НГК* коллекторскими свойствами обладают изменённые породы, развитые по карбонатным и терригенно-карбонатным образованиям, а также кора выветривания по магматическим и метаморфическим породам кислого состава. *Нижнеюрский НГК* представлен песчаными пластами Ю₁₇₋₁₆ урманской и Ю₁₅ салатской свит с ловушками структурно-литологического и тектонически экранированного типа. *Среднеюрский НГК* сформировался в объёме тюменской свиты, где выделяются песчано-алевритовые пласты Ю₁₄₋₂, разделённые углисто-глинистыми пачками. *Верхнеюрский НГК* объединяет васюганскую, георгиевскую и баженовскую свиты. Васюганская свита разделена по литологическому составу на нижнюю, существенно глинистую, и верхнюю подсвиты, где 4–5 песчаных пластов в совокупности составляют регионально-нефтегазоносный горизонт Ю₁. *Георгиевская свита* имеет глинистый состав и весьма непостоянную мощность по площади.

Для нижнемелового и верхнеюрского НГК основным источником углеводородов является РОВ сапропелевого типа *баженовской свиты* (J_3v), региональный генерационный потенциал которой обусловлен высоким содержанием Сор_г (до 12 %), катагенезом середины градации МК₁¹ и распространением по всей площади исследований мощностью от 8 до 30 м [23].

Меловой НГК характеризуется сложным геологическим строением пластов от берриаса до нижнего апта, преимущественным развитием неантиклинальных ловушек литологического и комбинированного типов.

Таблица 2. Характеристика месторождений УВ в пределах Нюрольской мегавпадины и структур ее обрамления

Table 2. Characteristics of hydrocarbon deposits within the Nyurolrka megadepression and the structures of its framing

| Месторождение Deposit | Условный номер (рис. 3, а) Conventional number (Fig. 3, a) | НГК Oil and gas bearing complex | Фазовое состояние Phase state | Горизонт (пласт) Horizon (bed) | |
|---|--|--|--|---|-----------------------------|
| Южно-Черемшанское Yuzhno-Cheremshanskoe | 1 | Меловой/Cretaceous | Нефть/Oil | A ₂₋₇ , A ₉ , B ₀ , B ₄₋₁₀ , B ₁₂₋₁₃ | |
| | | Верхнеюрский/Upper-Jurassic | | Ю ₁ ³⁻⁴ | |
| Южно-Мыльдзинское Yuzhno-Myldzhinskoe | 2 | Меловой/Cretaceous | Нефть/Oil | B ₉₋₁₃ | |
| | | Верхнеюрский/Upper-Jurassic | | Ю ₁ ¹⁻⁴ | |
| | | Среднеюрский/Middle-Jurassic | | Ю ₂ | |
| Мыльдзинское/Myldzhinskoe | 3 | Меловой/Cretaceous | Газоконденсат Gas-condensate | B ₁₆₋₂₀ (Ач), B ₉₋₁₀ , A ₃ | |
| | | Верхнеюрский/Upper-Jurassic | Нефть/Oil | Ю ₁ ³⁻⁴ | |
| Средненюрольское/Srednenyurolskoe | 4 | Среднеюрский/Middle-Jurassic | Верхнеюрский Upper-Jurassic | Ю ₁ ^M , Ю ₁ ³⁻⁴ | |
| Пуглалымское/Puglalymskoe | 5 | | | Ю ₁ ³⁻⁴ | |
| Ключевское/Klyuchevskoe | 6 | | | Ю ₁ | |
| Западно-Ключевское Zapadno-Klyuchevskoe | 7 | | Нефть, газ/oil, gas | Ю ₁ ¹⁻³ | |
| Лонтынь-Яхское/Lontyn-Yakhskoe | 8 | | Нефть/Oil | Ю ₁ | |
| Поселковое/Poselkovoe | 9 | | | Ю ₁ ³⁻⁴ | |
| Северо-Карасевское Severo-Karasevskoe | 10 | | | Ю ₁ ³⁻⁴ | |
| Карасевское/Karasevskoe | 11 | | | Ю ₁ ³⁻⁴ | |
| Западно-Карасевское Zapadno-Karasevskoe | 12 | | | Ю ₁ ¹⁻² | |
| Чворовое/Chvorovoe | 13 | | | Ю ₁ ¹⁻² | |
| Верхнесалатское/Verkhnesalatskoe | 14 | | | Ю ₁ ¹⁻⁵ | |
| Двуреченское/Dvurechenskoe | 15 | | | Ю ₁ | |
| Западно-Моисеевское Zapadno-Moiseevskoe | 16 | | | Ю ₁ | |
| Моисеевское/Moiseevskoe | 17 | | | Ю ₁ ³⁻⁴ | |
| Крапивинское/Krapivinskoe | 18 | | | Ю ₁ ²⁻³ | |
| Тагайское/Tagayskoe | 19 | | | Ю ₁ | |
| Глуховское/Glukhovskoe | 20 | | | Нефть, газ/Oil, gas | Ю ₁ ¹ |
| Поньжевое/Ponzhevoe | 21 | | | Ю ₁ ¹ , Ю ₁ ³ | |
| Федюшкинское/Fedyushkinskoe | 22 | Нефть/Oil | | Ю₀, Ю₁ | |
| Западно-Карайское Zapadno-Karayskoe | 23 | Нефть, газ/Oil, gas | Ю ₁ ¹⁻⁴ | | |
| Карайское/Karayskoe | 24 | Нефть/Oil | Ю _{4,6} | | |
| Игольско-Таловое/Igolsko-Talovoe | 25 | Нефть/Oil | Ю ₁ ² | | |
| Тамратское/Tamratskoe | 26 | Нефть, газ/Oil, gas | Ю ₁ ¹⁻² | | |
| Западно-Лугинецкое Zapadno-Luginetskoe | 27 | Нефть, газоконденсат Oil, gas-condensate | Ю ₄ ¹⁻² | | |
| Южно-Майское Yuzhno-Mayskoe | 28 | Нижнеюрский/Lower-Jurassic | Ю ₁ | | |
| Еллейское/Elleyskoe | 29 | | Верхнеюрский/Upper-Jurassic | Ю ₁₅ | |
| Кулгинское/Kulginskoe | 30 | Верхнеюрский/Upper-Jurassic | Нефть, газоконденсат Oil, gas-condensate | Ю ₁ ¹⁻² | |
| Колотушное/Kolotushnoe | 31 | Верхнеюрский/Upper-Jurassic | Нефть, газ/Oil, gas | Ю ₁ | |
| Шингинское/Shinginskoe | 32 | Верхнеюрский/Upper-Jurassic | Нефть/Oil | Ю ₁ ¹ | |
| Налимье/Nalime | 33 | Верхнеюрский/Upper-Jurassic | | Ю ₁ ¹ | |
| Майское/Mayskoe | 34 | Верхнеюрский/Upper-Jurassic | | Ю ₁ ³⁻⁴ | |
| | | Нижнеюрский/Lower-Jurassic | Нефть, газ/Oil, gas | Ю ₁₆₋₁₅ | |
| Нижнетабаганское Nizhnetabaganskoe | 35 | Верхнеюрский/Upper-Jurassic | Газоконденсат Gas condensate | Ю ₁ | |
| | | Среднеюрский/Middle-Jurassic | Нефть/Oil | Ю ₃ | |
| | | Среднеюрский/Middle-Jurassic | Газ/Gas | Ю ₅ | |
| | | Палеозойский/Palaeozoic | Нефть/Oil | M, M ₁₋₁₀ | |

Окончание табл. 2

Table 2

| Месторождение Deposit | Условный номер (рис. 3, а) Conventional number (Fig. 3, a) | НГК Oil and gas bearing complex | Фазовое состояние Phase state | Горизонт (пласт) Horizon (bed) | |
|--|--|---------------------------------|--|--------------------------------|-------------------|
| Водораздельное/Vodorazdelnoe | 36 | Среднеюрский/Middle-Jurassic | Газ, конденсат Gas, condensate | Ю ₇ | |
| Смоляное/Smolyanoe | 37 | Среднеюрский/Middle-Jurassic | Нефть/Oil | Ю ₄ | |
| Тамбаевское/Tambaevskoe | 38 | Палеозойский/Palaeozoic | | PZ | |
| Широтное/Shirotnoe | 39 | Среднеюрский/Middle-Jurassic | | Ю ₁₃ | |
| Северо-Фестивальное Severo-Festivalnoe | 40 | Нижнеюрский/Lower-Jurassic | Нефть, газ/Oil, gas | Ю ₁₆ | |
| | | Палеозойский/Palaeozoic | | M | |
| Фестивальное/Festivalnoe | 41 | Среднеюрский/Middle-Jurassic | Нефть/Oil | Ю ₁₃ | |
| | | Палеозойский/Palaeozoic | | M | |
| Речное/Rechnoe | 42 | Палеозойский/Palaeozoic | Газоконденсат Gas-condensate | M ₁ | |
| Арчинское/Archinskoe | 43 | Верхнеюрский/Upper-Jurassic | Нефть/Oil | Ю ₁ ¹ | |
| | | Среднеюрский/Middle-Jurassic | | Ю ₁₄ | |
| | | Нижнеюрский/Lower-Jurassic | | Ю ₁₅ | |
| | | Палеозойский/Palaeozoic | | M ₁ | |
| Урманское/Urmanskoe | 44 | Среднеюрский/Middle-Jurassic | Нефть, газоконденсат Oil, gas-condensate | Ю _{7,14} | |
| | | Нижнеюрский/Lower-Jurassic | | Ю ₁₅ | |
| | | Палеозойский/Palaeozoic | | M, M ₁ | |
| Чагинское/Chagvinskoe | 45 | Верхнеюрский/Upper-Jurassic | Нефть/Oil | Ю ₁ | |
| Среднемайское/Srednemayskoe | 46 | Нижнеюрский/Lower-Jurassic | | Ю ₁₄₋₁₅ | |
| Мыгинское/Myginskoe | 47 | Верхнеюрский/Upper-Jurassic | | Ю ₁ ¹ | |
| Глухариное/Glucharinoe | 48 | Верхнеюрский/Upper-Jurassic | | Ю ₁ ¹ | |
| Южно-Тамбаевское Yuzhno-Tambaevskoe | 49 | Палеозойский/Palaeozoic | | Нефть/Oil | M, M ₁ |
| | | | | | |

На рис. 3, б, приведена схематическая карта распределения расчетных значений *плотности теплового потока из основания осадочного чехла*. Карта построена путем интерполяции значений теплового потока, полученного решением обратной задачи геотермии в моделях распространения тепла 39 скважин. В качестве «наблюденных» использованы пластовые температуры, замеренные при испытании скважин, и палеотемпературы, определенные по ОСВ из керна этих скважин (табл. 3).

Реконструкция термической истории баженовской свиты и районирование по плотности ресурсов сланцевой нефти

В моделях 39-ти скважин решением прямых задач геотермии на ключевые времена *восстановлена термическая история баженовских отложений*. На эти времена, путем интерполяции геотемператур в разрезах скважин, построены схематические карты распределения геотемператур (рис. 4). По геотемпературному критерию выделены *палеоочаги интенсивной генерации баженовских нефтей*. Учитывая, что РОВ баженовской свиты сапропелевого типа, пороговая температура, определяющая границу очага генерации нефтей, принята равной 85 °С.

Первые очаги генерации баженовской нефти появились 91,6 млн лет назад (конец формирования покурской свиты) в южной части Кулан-Игайской впадины, в восточных частях Фестивального вала и Тамрадской впадины, в зонах сочленения депрессии с обрамляющими положительными структурами (рис. 4, а). Через 5 млн лет (конец формирования ипатовской свиты) очаги объединились, охватив центральную и восточную части исследуемой территории (рис. 4, б). В течение последующих 25 млн лет (конец формирования ганькинской свиты) продолжалась «работа» очагов, увеличивалась их площадь (рис. 4, в).

Максимальный прогрев осадочной толщи произошёл при формировании чеганской свиты, 37,6 млн лет назад (рис. 4, г). Конец формирования некрасовской свиты (рис. 4, д) иллюстрирует начало охлаждения осадочного разреза, вызванное изменением климатических условий в олигоцене, которое продолжается до настоящего времени (рис. 4, е).

Путем интерполяции расчетного показателя *R* построена схематическая карта распределения *относительной плотности ресурсов генерированных баженовских нефтей* (рис. 5, а). Результаты *районирования Ньюрольской мегавпадины по плотности ресурсов сланцевой (аккумулятивной in situ) баженовской нефти* приведены на рис. 5, б.

Таблица 3. Пластовые температуры, измеренные при испытаниях глубоких скважин Нюрольской мегавпадины, и палеотемпературы, определенные по ОСВ (R_{vr}^0) в образцах керна (фрагмент из [24])

Table 3. Reservoir temperature measured when testing deep wells of Nurolrka megadepression and paleotemperatures defined by the vitrinite reflectance (VR) (R_{vr}^0) in the core samples (fragment from [24])

| Скважина Well | Условный индекс скважины (рис. 3, а) Conventional number (Fig. 3, a) | Пластовые температуры Reservoir temperatures | | Температуры по ОСВ Temperatures by vitrinite reflectance | | |
|--|---|--|--|---|------------------------------|---|
| | | Интервал (глубина), м Interval (depth), m | Температура пластовая*, °С Reservoir temperature*, °C | Глубина, м Depth, m | R_{vr}^{0**} , % | Палеотемпература по R_{vr}^0 , °С R_{vr}^0 paleotemperature, °C |
| Айсазская 1 Aysazskaya 1 | Ай-1 | 862 | 31 | 2700 | 0,62 | 96 |
| | | 2156 | 67 | 3150 | 0,76 | 115 |
| Арчинская 40 Archinskaya 40 | Ар-40 | – | – | 2820 | 0,64 | 99 |
| | | – | – | 2890 | 0,65 | 100 |
| Водораздельная 1 Vodorazdelnaya 1 | Во-1 | 2400–2406 | 74 | 2882 | 0,67 | 102 |
| | | 2650–2660 | 80 | 2991 | 0,70 | 106 |
| Глухарина 1 Glucharinaya 1 | Глу-1 | 2569–2574 | 100 | 2539 | 0,76 | 115 |
| | | – | – | 2613 | 0,76 | 115 |
| Глуховская 2 Glukhovskaya 2 | Гл-2 | 2928–2950 | 108 | – | – | – |
| | | 2932–2948 | 107 | – | – | – |
| | | 2962–2967 | 107 | – | – | – |
| Гордеевская 1 параметрическая Gordeevskaya 1 parametric | Го-1п | – | – | 2874 | 0,80 | 120 |
| Двуреченская 15 Dvurechenskaya 15 | Дв-15 | 2689–2692 | 83 | 2684 | 0,59 | 92 |
| | | 2682–2684 | 89 | 2686 | 0,58 | 91 |
| Еллейская 2 Eleyskaya 2 | Ел-2 | 2632–2640 | 84 | 2727 | 0,73 | 111 |
| | | 2650–2657 | 85 | | | |
| Западно-Моисеевская 31 Zapadno-Moiseevskaya 31 | ЗМ-31 | 2713–2718 | 85 | 2706 | 0,58 | 91 |
| | | – | – | 2713 | 0,59 | 92 |
| Западно-Крапивинская 223 Zapadno-Krapivinskaya 223 | ЗК-223 | 2756–2759 | 92 | 2746 | 0,59 | 92 |
| | | 2748–2753 | 92 | | | |
| Западно-Лугинецкая 183 Zapadno-Luginetskaya 183 | ЗЛ-183 | 2660–2664 | 95 | – | – | – |
| Заячья 50 Zayachya 50 | За-50 | – | – | 2835 | 0,75 | 114 |
| | | – | – | 2840 | 0,80 | 120 |
| Игольская 2 Igolskaya 2 | Иг-2 | 2750–2823 | 92 | 2800 | 0,70 | 106 |
| | | 2740–2773 | 95 | | | |

Примечание: * – данные испытаний глубоких скважин изучены и сведены из первичных «дел скважин», отчетов по подсчету запасов, из отчетов оперативного анализа и обобщения геолого-геофизических материалов по Томской области (материалы Томского филиала ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по СФО»); ** – ОСВ определены в Лаборатории геохимии нефти и газа Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (г. Новосибирск).

Note: * – The data of testing deep wells were studied and linked from the «well file», reserves assessment reports, reports of operational analysis and generalization of geology and geophysical evidence in Tomsk region (materials of Tomsk branch of «Territorial fund of geological information in SFD»). ** – VR is determined in the Laboratory of oil and gas geochemistry at the Institute of oil-and-gas geology and geophysics SB RAS (Novosibirsk).

Наиболее перспективными землями территории исследований на сланцевую нефть баженовской свиты являются южные части Кулан-Игайской впадины и Фестивального вала, Тамрадская впадина и обрамляющие восточную часть Нюрольской мегавпадины положительные структуры. Здесь наблюдается максимальная плотность ресурсов генерированных баженовских нефтей. В северной части территории, где разрабатывается Южно-Черемшанское месторождение нефти (рис. 3, а), отмечается повышенная плотность ресурсов баженовских нефтей.

Центральная часть депрессии, с выявленными очагами интенсивной генерации баженовских

нефтей, слабо изучена глубоким бурением. Северная часть Тамрадской впадины и южная часть Кулан-Игайской впадины могут быть рекомендованы для постановки поисковых работ на сланцевую нефть баженовской свиты.

Сопоставление прогнозного районирования с прямыми признаками нефтеносности баженовской свиты. Известно, что прямые признаки нефтеносности являются важным критерием при выборе/заверки первоочередных зон и площадей поисков. В этой связи и представлена сводка, подготовленная по материалам Томского территориально-геологического фонда (рис. 6).

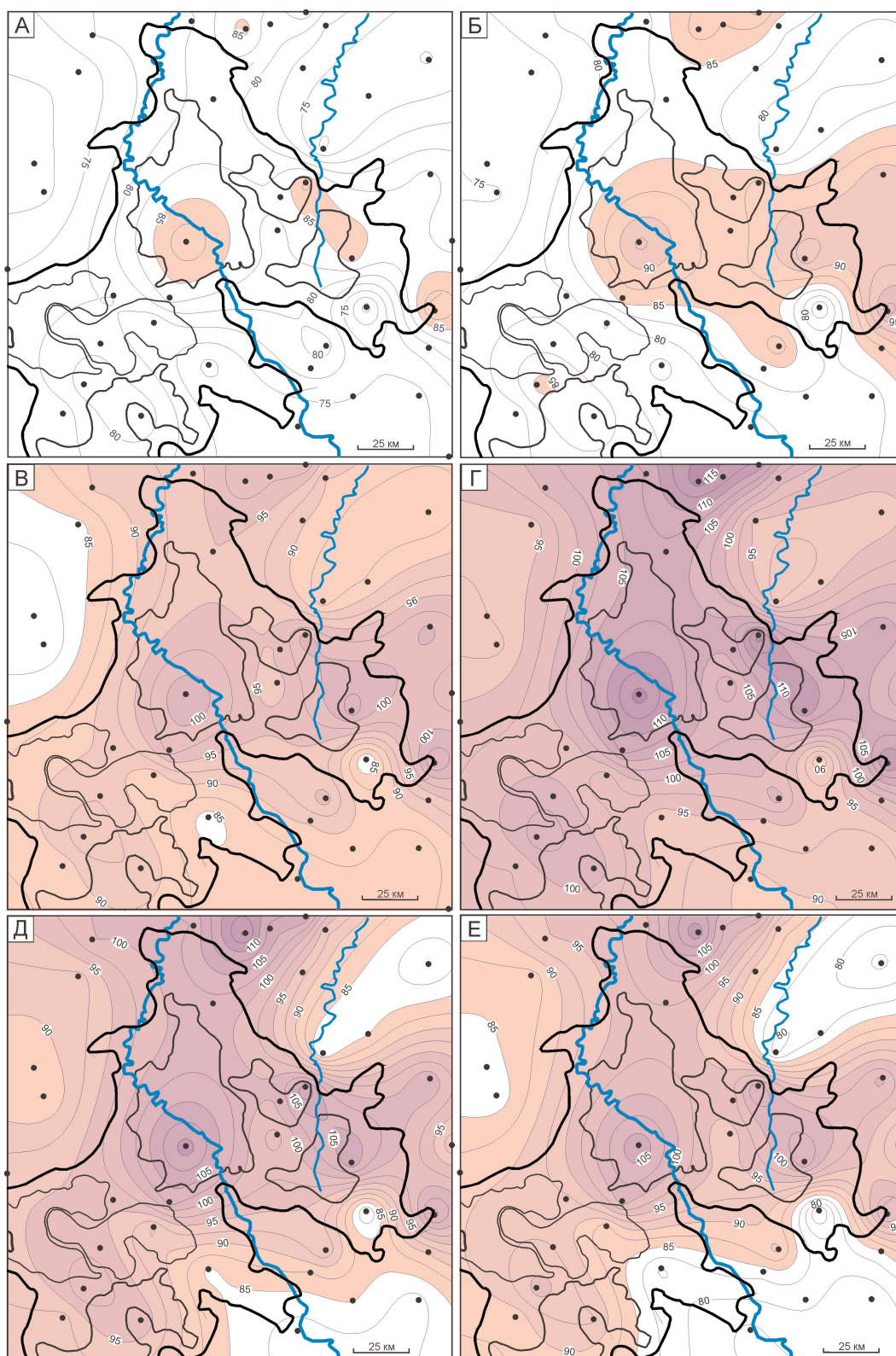


Рис. 4. Схематические карты распределения геотемператур (значение изолиний в °С) и положения очагов генерации баженовских нефтей Нурольской мегавпадины (с использованием [24]): а) 91,6; б) 86,5; в) 61,7; г) 37,6; д) 24,0 млн лет назад; е) в современном разрезе. Остальные условные обозначения те же, что на рис. 3

Fig. 4. Schematic maps of geotemperatures distribution (isolines values, °C) and positions of the centers of bazhenov oils generation of Nurolrka megadepression (using [24]): а) 91,6; б) 86,5; в) 61,7; г) 37,6; е) 24,0 million years ago; ф) in the modern section. The rest of the symbols are the same as in Fig. 3

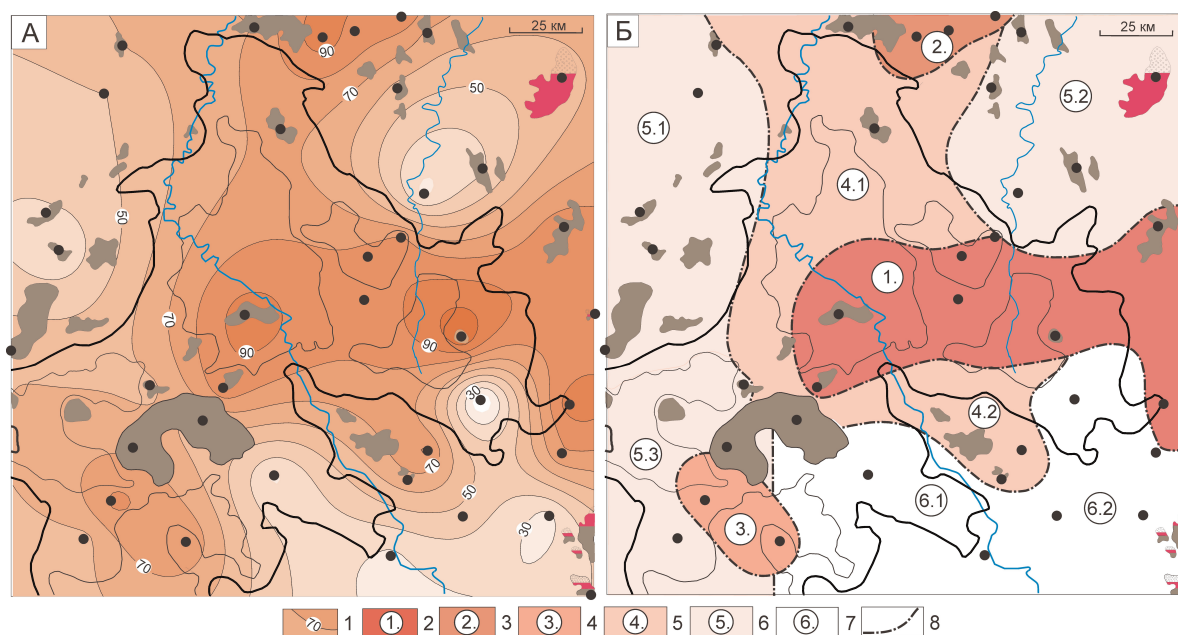


Рис. 5. Схематическая карта распределения относительной плотности ресурсов генерированных баженовских нефтей (а) и схема районирования сланцевой нефтегазоносности баженовской свиты (б) Нюрольской мегавпадины: 1 – изолинии значений показателя R , усл. ед.; 2–7 – районы (номер ранжирования по степени перспективности, диапазон значений R): 1 – 80–100, 2 – 80–90, 3 – 70–80, 4 – 60–70, 5 – 40–60, 6 – 30–60; 8 – границы районов. Остальные условные обозначения те же, что на рис. 3

Fig. 5. Schematic maps of distribution of the relative density of the resources of generated bazhenov oils (a) and scheme of zoning of shale oil-and-gas potential of Bazhenov suite in Nural'ka megadepression: 1 – the isolines of R index values, cond. u.; 2–7 are the areas (the number of ranking prospects extent, value range R): 1 – 80–100, 2 – 80–90, 3 – 70–80, 4 – 60–70, 5 – 40–60, 6 – 30–60; 8 are the boundaries of district. The rest of the symbols are the same as in Fig. 3

Как уже отмечалось выше, на Федюшкинском месторождении пласт Ю₀ испытан в открытом стволе скважины № 7 в 1986 г. в интервале 2765–2790 м: получен приток нефти 4,6 м³/сут, пластовая температура 91 °С (Тищенко В.М., Черкашина К.Я., 1989; Волков В.И., 2002). На Снежном месторождении непроницаемые породы баженовской свиты в 2014 г. вскрыты двумя наклонно-направленными скважинами. В результате проведения ГРП получен приток по 2 т нефти в каждой скважине (Каратаев А., 2015). Кроме того, *прямые признаки нефтеносности* баженовской свиты на территории Томской области установлены по результатам испытаний 4-х глубоких скважин, по керну и испытаниям 5-ти глубоких скважин, по первичному описанию керна – в 19-ти глубоких скважинах (рис. 6).

На рис. 6 дана сводная информация по размещению площадей поискового и разведочного бурения, в пределах которых скважины вскрыли баженовскую свиту с признаками нефтеносности. Здесь же выполнено сопоставление размещения этих площадей и прогнозных зон высоких перспектив

баженовской свиты на сланцевую нефть, из которого следует, что согласованность прогнозных зон высоких и средних перспектив на сланцевую нефть составляет: для территории Нюрольской мегавпадины и структур ее обрамления – не менее 80 %, для территории Усть-Тымской мегавпадины и структур ее обрамления – 100 %.

Заключение

Изложенная технология зонального районирования верхнеюрской баженовской материнской свиты по плотности ресурсов сланцевой нефти, в силу относительной простоты, оперативности и опоры, в основном на геофизические (геотермические) данные, может быть условно названа экспресс-районированием.

Достоверность зонального районирования уверенно контролируется сопоставлением с размещением месторождений, с признаками нефтегазоносности и притоками флюидов в глубоких скважинах из интервалов материнских пород.

Благодарим Л.В. Илларионову и Е.Н. Осипову – коллег по совместным исследованиям.

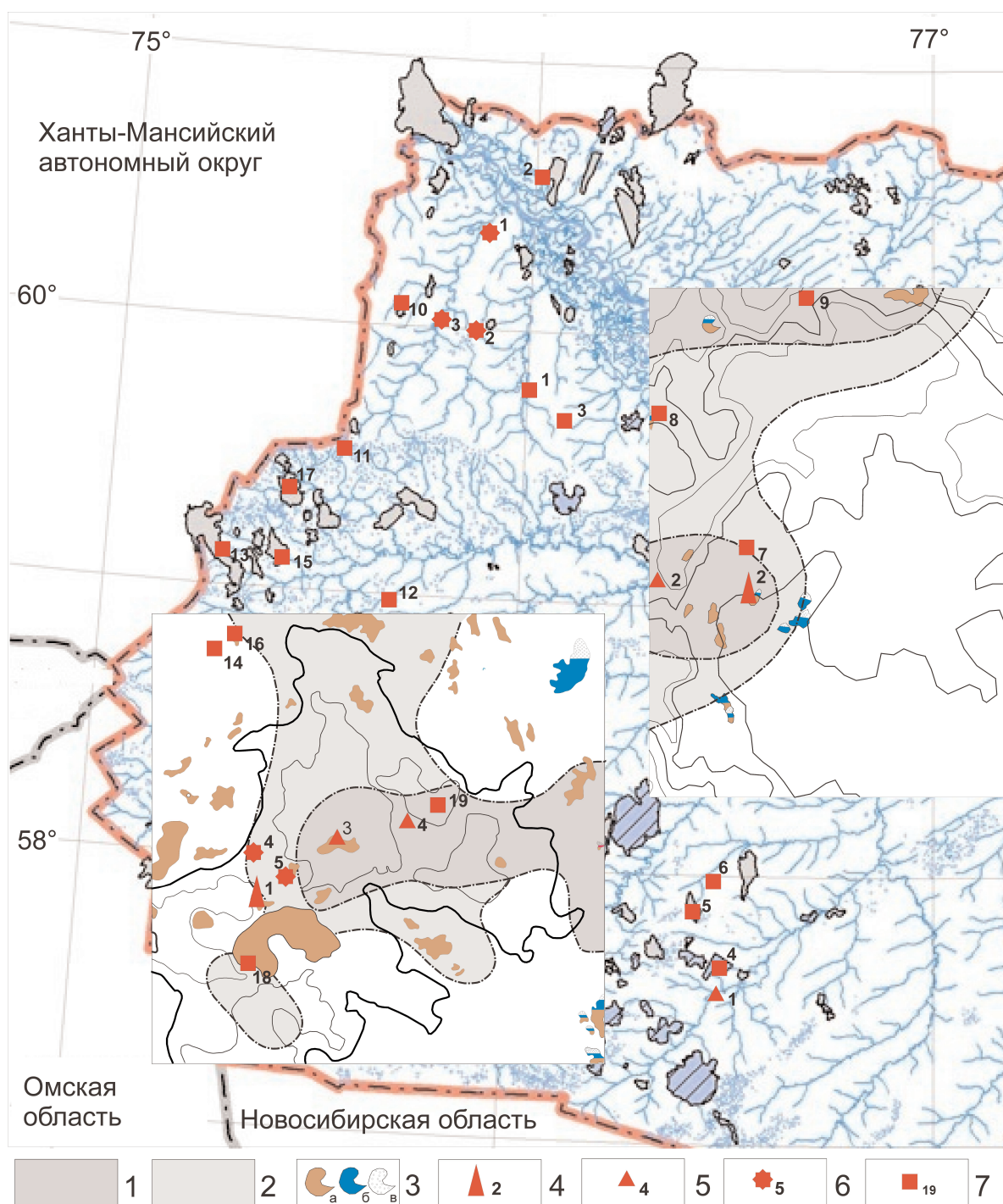


Рис. 6. Положение месторождений и площадей с прямыми признаками нефтеносности баженовской свиты Томской области. На врезках показаны территории прогнозных исследований – Нурольская мегавпадина и структуры ее обрамления, Усть-Тымская мегавпадина и структуры ее обрамления [25]: 1 – прогнозные зоны высоких перспектив на сланцевую нефть баженовской свиты; 2 – прогнозные зоны средних перспектив; 3 – месторождения с залежами в мезозойско-кайнозойском разрезе (а – нефтяная; б – конденсатная; в – газовая). Прямые признаки нефтеносности баженовской свиты: 4 – месторождение (пласт Ю₀), его условный номер (1 – Федюшкинское, 2 – Снежное); 5 – признак при испытании; 6 – признаки по керну и при испытании; 7 – признак по керну

Fig. 6. Position of fields and areas with direct signs of oil-bearing of Bazhenov suite in Tomsk region. The inset map indicates the territories of the forecasting research – Nurolrka megadepression and the structure of its framing, Ust-Tym megadepression and the structure of its framing [25]: 1 are the the forecast areas of high prospects for shale oil of Bazhenov suite; 2 are the forecast areas of the middle prospects; 3 are the fields with deposits in Mesozoic-Cenozoic section (a – oil, b – condensate; c – gas). Direct signs of oil-bearing of Bazhenov suite: 4 is the field (layer J₀), its code number (1 – Fedyushkinskoe 2 – Snezhnoe); 5 are the the test indication; 6 are the core and test indications; 7 is the indication of the core

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективы нефтегазоносности баженовской свиты в центральной части Широкого Приобья / К.Г. Скачек, А.И. Ларищев, О.И. Бостриков, А.В. Брылина, С.В. Видик // Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала Ханты-Мансийского автономного округа – Югры: материалы XV научно-практической конференции. Том 1. – Ханты-Мансийск: ИздатНаука-Сервис, 2012. – С. 105–113.
2. Конторович А.Э., Эдер Л.В. Новая парадигма стратегии развития сырьевой базы нефтедобывающей промышленности Российской Федерации // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2015. – № 5. – С. 8–17.
3. Определение экономических условий эффективности освоения запасов баженовской свиты / А.В. Шпильман, Н.Н. Захарченко, О.О. Душенко, С.А. Филатов // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 9. – С. 14–17.
4. Вассоевич Н.Б. Теория осадочно-миграционного происхождения нефти (исторический обзор и современное состояние) // Известия АН СССР. Сер. «Геология». – 1967. – № 11. – С. 135–156.
5. Connan J. Time-temperature relation in oil genesis // AAPG Bull. – 1974. – V. 5. – P. 2516–2521.
6. Конторович А.Э., Парпарова Г.М., Трушков П.А. Метаморфизм органического вещества и некоторые вопросы нефтегазоносности (на примере мезозойских отложений Западно-Сибирской низменности) // Геология и геофизика. – 1967. – № 2. – С. 16–29.
7. Прищепа О.М., Суханова А.А., Макарова И.Р. Методика определения зрелости сапропелевого органического вещества в доманикитах и оценка их углеводородных ресурсов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2015. – № 7. – С. 4–8.
8. Исаев В.И., Старостенко В.И. Оценка нефтегазоматеринского потенциала осадочных бассейнов Дальневосточного региона по данным гравиметрии и геотермии // Геофизический журнал. – 2004. – Т. 26. – № 2. – С. 46–61.
9. Isaev V.I., Fomin A.N. Loci of generation of bazhenov- and togurt-type oils in the southern Nyurofka megadepression // Russian Geology and Geophysics. – 2006. – V. 47. – № 6. – P. 734–745.
10. Estimation of the Oil-and-Gas Potential of Sedimentary Depression in the Far East and West Siberia Based on Gravimetry and Geothermy Data / R.Yu. Gulenok, V.I. Isaev, V.Yu. Kosygin, G.A. Lobova, V.I. Starostenko // Russian Journal of Pacific Geology. – 2011. – V. 5. – № 4. – P. 273–287.
11. Тектоническое строение и история развития Западно-Сибирской геосинеклизы в мезозое и кайнозое / В.А. Конторович, С.Ю. Беляев, А.Э. Конторович, В.О. Красавчиков, А.А. Конторович, О.И. Супруненко // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42. – № 11–12. – С. 1832–1845.
12. Шкала геологического времени / У.Б. Харленд, А.В. Кокс, П.Г. Ллевеллин, К.А.Г. Пиктон, А.Г. Смит, Р. Уолтерс. – М.: Мир, 1985. – 140 с.
13. Компьютерная технология комплексной оценки нефтегазового потенциала осадочных бассейнов / В.И. Исаев, Р.Ю. Гуленок, О.В. Веселов, А.В. Бычков, Ю.Г. Соловейчик // Геология нефти и газа. – 2002. – № 6. – С. 48–54.
14. Исаев В.И., Искоркина А.А. Мезозойско-кайнозойский ход температур на поверхности Земли и геотермический режим юрских нефтематеринских отложений (южная палеоклиматическая зона Западной Сибири) // Геофизический журнал. – 2014. – Т. 36. – № 5. – С. 64–80.
15. Эволюция температурного поля осадочного чехла Западно-Сибирской плиты / А.Д. Дучков, Ю.И. Галушкин, Л.В. Смирнов, Л.С. Соколова // Геология и геофизика. – 1990. – № 10. – С. 51–60.
16. Хант Дж. Геохимия и геология нефти и газа. – М.: Мир, 1982. – 704 с.
17. Старостенко В.И. Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии. – Киев: Наук. думка, 1978. – 228 с.
18. Модель катагенеза органического вещества (на примере баженовской свиты) / Л.М. Бурштейн, Л.В. Жидкова, А.Э. Конторович, В.Н. Меленевский // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. – № 6. – С. 1070–1078.
19. Лобова Г.А., Попов С.А., Фомин А.Н. Локализация прогнозных ресурсов нефти юрско-меловых НГК Усть-Тымской мега-вападины // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 2. – С. 36–40.
20. Isaev V.I., Lobova G.A., Osipova E.N. The oil and gas contents of the Lower Jurassic and Achimovka reservoirs of the Nyurofka megadepression // Russian Geology and Geophysics. – 2014. – V. 55. – P. 1418–1428.
21. Tissot B.P. Preliminary Data on the Mechanisms and Kinetics of the Formation of Petroleum in Sediments. Computer Simulation of a Reaction Flowsheet // Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP. – 2003. – V. 58. – № 2. – P. 183–202.
22. Попов С.А., Исаев В.И. Моделирование нафтидогенеза Южного Ямала // Геофизический журнал. – 2011. – Т. 33. – № 2. – С. 80–104.
23. Катагенез органического вещества в кровле и подошве юрского комплекса Западно-Сибирского мегабассейна / А.Э. Конторович, А.Н. Фомин, В.О. Красавчиков, А.В. Истомина // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50. – № 11. – С. 1191–1200.
24. Нефтегазоносность нижнемеловых резервуаров Нюрольской мегавападины / Е.Н. Осипова, Г.А. Лобова, В.И. Исаев, В.И. Старостенко // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 1. – С. 14–33.
25. Схемы районирования Усть-Тымской мегавападины по плотности ресурсов сланцевой нефти тогурской и баженовской свит / В.И. Исаев, Г.А. Лобова, В.И. Старостенко, А.Н. Фомин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 12. – С. 6–19.

Поступила 25.02.2016.

Информация об авторах

Исаев В.И., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геофизики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Исаева О.С., руководитель Томского филиала ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по Сибирскому федеральному округу».

Лобова Г.А., доктор геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Старостенко В.И., доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН Украины, директор Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины.

Фомин А.Н., доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геохимии нефти и газа Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

UDC 553.98

EXPRESS ZONING OF THE PARENT SUITE ON DENSITY OF GENERATED OIL RESOURCES (BY THE EXAMPLE OF NYUROLKA MEGADEPRESSION)

Valeriy I. Isaev¹,
isaevvi@tpu.ru

Olga S. Isaeva²,
isaeva_sah@mail.ru

Galina A. Lobova¹,
lobovaga@tpu.ru

Vitaly I. Starostenko³,
vstar@igph.kiev.ua

Aleksandr N. Fomin⁴,
fominan@ipgg.sbras.ru

¹ Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia.

² Territorial geological fund across Siberian Federal District,
9, Mokrushin Street, Tomsk, 634050, Russia.

³ Institute of Geophysics named after S.I. Subbotin NAS Ukraine,
32, Palladin Avenue, Kiev, 03142, Ukraine.

⁴ Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A.A. Trofimuk SB RAS,
3, Ac. Koptueg Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to develop the criteria and to improve the technique of assessing hard-to-produced reserves of shale oil (accumulated in situ) of Bazhenov suite in Western Siberian oil-and-gas province.

The main aim of the research is to define the methodology, a set of initial geological and geophysical data and demonstrate the technique of zoning oil source deposits on shale oil resource density.

The object of research is the Upper Jurassic Bazhenov sediments of Mesozoic and Cenozoic section penetrated by deep wells in the south-east of Western Siberia.

Methodology and technology of the research. Duration and temperature of the main phase of oil generation are accepted as the key factor detailing the characteristics of the parent suite as the one supplying higher/lower located clastic reservoirs or as shale formation (N.B. Vassoevich, 1967); and the main volume of oil generated, accumulated in situ, or emigrated to the collector, are located there where the parent deposits are/were to a greater extent in the main zone of oil formation (A.E. Kontorovich et al., 1967). The zoning technique is based on the method of paleotemperature modeling which allows reconstructing thermal history of the parent deposits, allocating oil generation sources by geothermal criteria and mapping them. The generated oil resources are estimated by an integral index, depending on the time, which the parent suite spent in the main zone of oil formation, and on its temperatures.

Research results. The paper demonstrates the zoning technique of Nurolrka megadepression and the structures of its framing, based on the method of paleotemperature modeling that fits organically into the methodology of the theory of oil generation main phase and threshold temperatures for the parent deposits occurrence in the main zone of oil formation. The authors have determined the promising regions and areas of the slate (accumulated in situ) Bazhenov oil. The oil seeps and flows in deep wells from the intervals of the parent rocks and clastic reservoirs prove zoning substantiality.

Ключевые слова:

Bazhenov suite, shale oil, paleotemperature modeling, resources, zoning Nurolrka megadepression.

The authors thank Illarionova L.V. and Osipova E.N. for joint research.

REFERENCES

1. Skachek K.G., Larichev A.I., Bostrikov O.I., Brylina A.V., Vidik S.V. Perspektivy neftegazonosnosti bazhenovskoy svity v tsentralnoy chasti Shirotnogo Priobyia [Prospects for oil-and-gas content of Bazhenov suite in central part of latitudinal Ob region]. *Puti realizatsii neftegazovogo i rudnogo potentsiala Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga-Yugry. XV nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [Ways of implementation of oil-and-gas and ore potential in Khanty-Mansiysk autonomous region – Yugra. XV scientific conference]. Khanty-Mansiysk, 2012. Khanty-Mansiysk, IzdatScienceService Publ., 2012. Vol. 1, pp. 105–113.
2. Kontorovich A.E., Eder L.V. The new paradigm in development strategy of the raw material base of the oil industry in the Russian Federation. *Mineral Resources of Russia. Economics and Management*, 2015, no. 5, pp. 8–17. In Rus.
3. Shpilman A.V., Zakharchenko N.N., Dushenko O.O., Filatov S.A. Determination of economic conditions in efficiency of develop-

- ment of the Bazhenov suite reserves. *Oil Industry*, 2015, no. 9, pp. 14–17. In Rus.
4. Vassoevich N.B. Teoriya osadochno-migracionnogo proiskhozhdeniya nefiti (istoricheskiy obzor i sovremennoe sostoyanie) [Theory of sedimentary and migratory origin of oil (historical review and current state)]. *Bulletin of the AN USSR. Ser. Geol.*, 1967, no. 11, pp. 135–156.
 5. Connan J. Time-temperature relation in oil genesis. *AAPG Bull.*, 1974, vol. 5, pp. 2516–2521.
 6. Kontorovich A.E., Parparova G.M., Trushkov P.A. Metamorfizm organicheskogo veshchestva i nekotorye voprosy neftegazonosti (na primere mezozoyskikh otlozheniy Zapadno-Sibirskoy nizmennosti) [Metamorphism of organic substance and some issues of petroleum content (on the example of Mesozoic deposits of the West Siberian lowland)]. *Russian Geology and Geophysics*, 1967, no. 2, pp. 16–29.
 7. Prishchepa O.M., Sukhanova A.A., Makarova I.R. Technique of definition of maturity of sapropelic organic substance in domanikit and assessment of their hydrocarbonic resources. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*, 2015, no. 7, pp. 4–8. In Rus.
 8. Isaev V.I., Starostenko V.I. Evaluation of oil-and-gas potential of sedimentary basins of the Far East region according to the Gravimetry and Geothermy Data. *Geophysical journal*, 2004, vol. 26, no. 2, pp. 46–61. In Rus.
 9. Isaev V.I., Fomin A.N. Lofi of generation of bazhenov- and togur-type oils in the southern Nyuroł'ka megadepression. *Russian Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 6, pp. 734–745.
 10. Gulenok R.Yu., Isaev V.I., Kosygin V.Yu., Lobova G.A., Starostenko V.I. Estimation of the Oil-and-Gas Potential of Sedimentary Depression in the Far East and West Siberia Based on Gravimetry and Geothermy Data. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2011, vol. 5, no. 4, pp. 273–287.
 11. Kontorovich V.A., Belyaev S.Yu., Kontorovich A.E., Krasavchikov V.O., Kontorovich A.A., Suprunenko O.I. Tectonic structure and history of development of West Siberian geosyncline in Mesozoic and Cenozoic. *Russian Geology and Geophysics*, 2001, vol. 42, no. 11, pp. 1832–1845. In Rus.
 12. Harlend U.B., Koks A.V., Llevellin P.G., Pikton K.A.G., Smit A.G., Uolters R. Shkala geologicheskogo vremeni [Scale of geological time]. Moscow, Mir Publ., 1985. 140 p.
 13. Isaev V.I., Gulenok R.Yu., Veselov O.V., Bychkov A.V., Solovey-chik Yu.G. Computer technology of integrated assessment of oil and gas potential of sedimentary basins. *Oil and Gas Geology*, 2002, no. 6, pp. 48–54. In Rus.
 14. Isaev V.I., Iskorkina A.A. The Mesozoic and Cenozoic temperature course on the Earth surfaces and geothermal mode of the Jurassic petromaternal deposits (southern paleoclimatic zone of Western Siberia). *Geophysical journal*, 2014, vol. 36, no. 5, pp. 64–80. In Rus.
 15. Duchkov A.D., Galushkin Yu.I., Smirnov L.V., Sokolova L.S. The evolution of the temperature field of the sedimentary cover of the West Siberian Plate. *Russian Geology and Geophysics*, 1990, no. 10, pp. 51–60. In Rus.
 16. Hunt J. Geokhimiya i geologiya nefiti i gaza [Geochemistry and geology of oil and gas]. Moscow, Mir Publ., 1982. 704 p.
 17. Starostenko V.I. Ustoychivye chislennyye metody v zadachakh gravimetrii [Stable numerical methods in problems of gravimetry]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1978. 228 p.
 18. Burshteyn L.M., Zhidkova L.V., Kontorovich A.E., Melenevskiy V.N. The model of katagenesis of organic matter (by the example of Bazhenov suite). *Russian Geology and Geophysics*, 1997, vol. 38, no. 6, pp. 1070–1078. In Rus.
 19. Lobova G.A., Popov S.A., Fomin A.N. Probable oil resource localization for Jurassic and Cretaceous oil-and-gas complexes of the Ust-Tym megadepression. *Oil Industry*, 2013, no. 2, pp. 36–40. In Rus.
 20. Isaev V.I., Lobova G.A., Osipova E.N. The oil and gas contents of the Lower Jurassic and Achimovka reservoirs of the Nyuroł'ka megadepression. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, pp. 1418–1428.
 21. Tissot B.P. Preliminary Data on the Mechanisms and Kinetics of the Formation of Petroleum in Sediments. Computer Simulation of a Reaction Flowsheet. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, 2003, vol. 58, no. 2, pp. 183–202.
 22. Popov S.A., Isaev V.I. Modeling of naftidogenesis of Southern Yamal. *Geophysical journal*, 2011, vol. 33, no. 2, pp. 80–104. In Rus.
 23. Kontorovich A.E., Fomin A.N., Krasavchikov V.O., Istomin A.V. Catagenesis of organic matter at the top and base of the Jurassic complex in the West Siberian megabasin. *Russian Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 11, pp. 1191–1200. In Rus.
 24. Osipova E.N., Lobova G.A., Isaev V.I., Starostenko V.I. Petroleum potential of the Lower Cretaceous reservoirs of Nyuroł'ka megadepression. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 1, pp. 14–33. In Rus.
 25. Isaev V.I., Lobova G.A., Starostenko V.I., Fomiv A.N. Zonation schemes of Ust-Tym megadepression by density of shale oil resources of the Togur and Bazhenov source rock formations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 12, pp. 6–19.

Received: 25 February 2016.

Information about the authors

Valeriy I. Isaev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Olga S. Isaeva, Head of the Tomsk branch of the FBU «Territorial fund of geological information in Siberian Federal District».

Galina A. Lobova, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vitaliy I. Starostenko, Dr. Sc., professor, academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Director of the Institute of Geophysics named after S.I. Subbotin NAS Ukraine.

Aleksandr N. Fomin, Dr. Sc., Head of the Laboratory, A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS.

УДК 504:551.24

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ И САХАРНЫЙ ДИАБЕТ

Фархутдинов Исхак Мансурович^{1,2},
iskhakgeo@gmail.com

Фархутдинова Лейла Муратовна³,
farkhutdinova@gmail.com

Суфияров Ринат Сабитович⁴,
sufiyarovrs@doctorrb.ru

¹ Башкирский государственный университет,
Россия, 450076, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

² Институт геологии Уфимского научного центра Российской академии наук,
Россия, 450077, г. Уфа, ул. К. Маркса, 16/2.

³ Институт последипломного образования Башкирского государственного медицинского университета,
Россия, 450076, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Ленина, 3.

⁴ Медицинский информационно-аналитический центр Республики Башкортостан,
Россия, 450057, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 48.

На геохимический состав почв оказывают существенное влияние как природные явления, такие как естественное разрушение горных пород, так и техногенные факторы, связанные с утилизацией отходов нефте- и горнодобывающих, а также горнообогатительных предприятий. Актуальность работы обусловлена широкой распространенностью сахарного диабета и его медико-социальной значимостью. Большое разнообразие геологических структур (платформа, предгорный прогиб, складчатая область) и горных пород (осадочные, вулканогенные, магматические, метаморфические породы различного состава, строения и возраста) в пределах Республики Башкортостан, обуславливающее региональные особенности микроэлементного профиля биосферы, позволяет использовать данный регион как уникальный научный полигон для изучения медико-биологической роли геологических факторов.

Цель работы: изучить влияние геологических факторов и особенностей микроэлементного состава местности на развитие сахарного диабета.

Методы исследования. Использованы результаты опробования почв на содержание 45 химических элементов в различных геологических зонах, оценена распространенность сахарного диабета в Республике Башкортостан по данным регистра диабета за 2010–2014 гг. в зависимости от геологических условий местности; проведено картирование распространенности заболевания с использованием программы ArcGIS 10.2, метод классификации – «natural breaks».

Результаты. Показана согласованность региональных геологических условий с особенностями элементного состава местности и распространенностью сахарного диабета. Зоны развития карбонатных пород и повышенной концентрации тектонических дислокаций ассоциируются с увеличением содержания железа и бериллия в почве и снижением распространенности заболевания. Территория, сложенная породами континентального происхождения, характеризуется снижением уровня железа и бериллия в почве и относительным повышением распространенности сахарного диабета.

Ключевые слова:

Сахарный диабет, геоэкология, микроэлементы, медицинская геология, геотектоника, разломы, Урал, окружающая среда.

Реальный организм неразрывно связан с окружающей средой, и можно отделить его от нее только мысленно.

В.И. Вернадский

Введение

По современным представлениям внешняя среда является основным фактором, определяющим состояние здоровья человека. На геохимический состав почв и водоёмов существенное влияние оказывает ряд факторов как естественного происхождения, например геологический и биологический круговорот веществ, так и техногенного происхождения, определяемых последствиями деятельности нефте- и горнодобывающих, а также горнообогати-

тельных производств. В этой связи актуальна проблема взаимосвязи геоэкологии и здоровья населения. На сегодняшний день имеется целый ряд работ, отражающих медико-биологическую роль геоэкологических условий местности проживания [1–4].

Ведущим фактором геологической среды являются содержащиеся в горных породах микроэлементы, которые, как известно, в живых организмах не синтезируются. Исследованиями ряда авторов выявлена тесная взаимосвязь между микро-

элементным статусом зоны проживания и организма человека, что позволило осуществить микроэлементное районирование территории республики Башкортостан [2, 5, 6].

Накопившиеся за последние десятилетия сведения о влиянии местности проживания на развитие диабета и роли микроэлементов в регуляции углеводного обмена [7–11] свидетельствуют о целесообразности и перспективности углубленных междисциплинарных исследований влияния элементного статуса окружающей среды на развитие данного заболевания, представляющего собой чрезвычайно актуальную медико-социальную проблему современности. Фундаментальные исследования по выяснению механизмов влияния внешней среды на развитие диабета являются одними из наиболее приоритетных. В этом отношении большой интерес представляют геологические факторы (состав и структура горных пород, рельеф и палеорельеф, разломы, надвиги и др.), определяющие геохимическую спецификацию местности.

В Башкортостане исследования многих авторов посвящены проблеме взаимосвязи геоэкологии и состояния здоровья жителей [12–15], однако сведения о влиянии геологической среды на развитие диабета единичны.

Цель исследования – изучить влияние геологических факторов и особенностей микроэлементного состава местности на развитие сахарного диабета.

Материалы и методы

Исследование взаимосвязи геологических условий и микроэлементного состава местности проживания с распространенностью диабета проведено на территории Республики Башкортостан (РБ). Западная часть республики приурочена к юго-восточной окраине Восточно-Европейской платформы, а восточная часть – к складчатому Уралу. Широкий диапазон геологических структур (платформа, предгорный прогиб, складчатая область) и горных пород (осадочные, вулканогенные, магматические, метаморфические породы различного состава, строения и возраста (рис. 1) [16]), обуславливающий разнообразие микроэлементного профиля биосферы, позволяет использовать данный регион как уникальный научный полигон для изучения биологической роли геологических факторов [17, 18].

Для выявления закономерностей микроэлементного состава местности в районах с различным геологическим строением были проанализированы результаты исследования почвы по содержанию 45 химических элементов из отчета Л.А. Криночкина и А.Б. Шкарина (ФГУП «ИМГРЭ») «Составление геохимических основ масштаба 1:1000 000 листов N-40,41,42, P-45,52,55,57, O-38,55,56» [19].

Распространенность диабета оценивалась по данным регистра диабета за 2010–2014 гг. Проанализированы показатели распространенности са-

харного диабета 2-го типа (СД2), представляющего основную форму заболевания (90 % случаев). С целью нивелирования техногенных факторов население промышленных центров РБ – Уфы, Стерлитамака, Салавата, Нефтекамска, Октябрьского, Сибая, Кумертау, Межгорья – исключено из статистики. Население, включенное в исследование, составило 2 189 026 человек – 53,83 % жителей республики (численность населения РБ по данным Госкомстата России составляет 4 065 993 чел. (2010)).

Проведено картирование распространенности СД2 в РБ с использованием компьютерной программы ArcGIS 10.2. Районы классифицировались по уровню распространенности СД2 на 4 группы по методу классификации «natural breaks». Статистическая обработка полученных результатов проводилась с применением пакета программ Statistica 10, Microsoft Excel 2007. Достоверными считались результаты при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение

Для выяснения закономерностей распределения микроэлементов на территории республики проведен сравнительный анализ содержания химических элементов в 3-х зонах, характеризующихся различным геологическим строением: западной, северной и уральской.

Западная зона республики сложена породами континентального (речного) происхождения, северная характеризуется выходами на поверхность карбонатных пород, имеющих морской генезис, а уральская приурочена к Южному Уралу и в геологическом отношении отличается высокой концентрацией тектонических нарушений по площади.

Оценка содержания 45 элементов в 472 пробах западной зоны, в 224 пробах северной и в 346 пробах уральской зоны выявила снижение уровня железа и бериллия с высокой степенью значимости на западной территории по сравнению с северной и уральской. Так, в западной зоне среднее содержание железа и бериллия в пробах составило 2563,8 и 0,346 мг/кг, в то время как в северной – 5176,9 и 0,631 мг/кг (при $p=0,0148$ и $p=0,0001$ соответственно), а в уральской – 4444,9 и 0,571 мг/кг (при $p=0,000144$ и $p=0,0001$ соответственно).

В отношении биологического значения наибольший интерес представляет железо, как один из самых распространенных химических элементов (около 5 % массы земной коры, 4-е место после кислорода, кремния и алюминия). Железо является также наиболее распространенным эссенциальным микроэлементом в организме человека (общее количество около 5 г), участвующим в функционировании более 70 ферментов. В отличие от железа бериллий относится к редким элементам ($2,6 \cdot 10^{-4}$ % массы земной коры), а его биологическая роль требует уточнения.

Выявленные закономерности содержания железа в почвах согласуются с особенностями геоло-

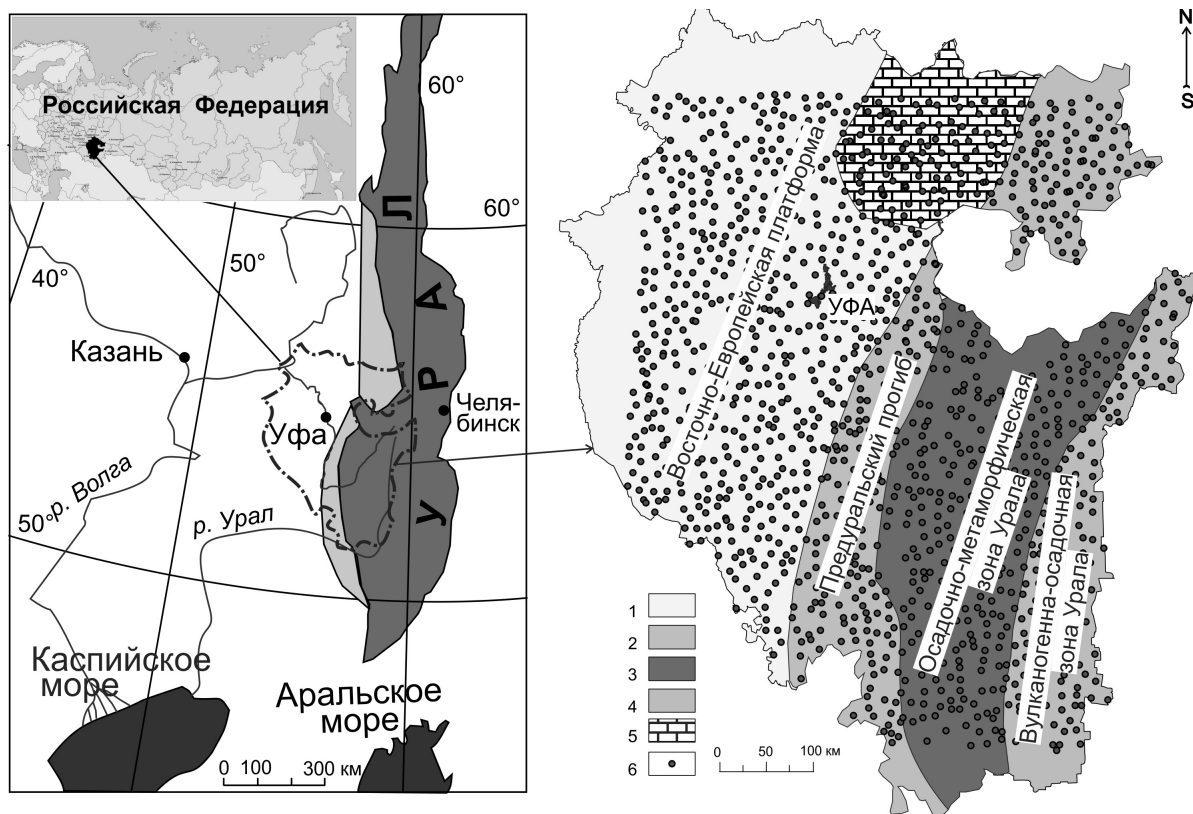


Рис. 1. Обзорная и тектоническая схема Республики Башкортостан: 1–4 – структурно-формационные зоны: 1 – Восточно-Европейская платформа; 2 – Предуральский прогиб; 3 – осадочно-метаморфическая зона Урала; 4 – вулканогенно-осадочная зона Урала; 5 – зона распространения известняков Уфимского плато; 6 – места отбора проб

Fig. 1. Review and tectonic scheme of the Republic of Bashkortostan: 1–4 are the structural-formational zones: 1 is the East European platform; 2 is the Pre-Ural foredeep; 3 is the sedimentary-metamorphic zone of the Urals; 4 is the volcanic-sedimentary zone of the Urals; 5 is the area of limestone distribution on the Ufimian plateau; 6 are the sampling locations

гического строения местности. Распространенные в западной зоне породы речного происхождения образовались в процессе размывания горного Урала пресными водами, что привело к выщелачиванию растворимых химических соединений. В результате контакта с кислородом в условиях мелководья содержащиеся в породах химические элементы с переменной валентностью окисляются с образованием более прочных соединений. Так, железо окисляется из двухвалентного до трехвалентного, соли которого менее растворимы. Как известно, растения усваивают железо в двухвалентной форме. Преимущественное содержание в породах речного происхождения соединений трехвалентного железа обуславливает их красноватый оттенок, благодаря которому они называются красноцветами. Именно красноцветными толщами сложена западная территория республики.

Наиболее высокий уровень железа в почвах на севере республики также закономерен с геологической точки зрения. В отличие от континентальной западной части, северная часть республики характеризуется выходами карбонатных пород, имеющих морской генезис. Как известно, карбонатные отложения легко выщелачиваются водой, что обус-

печивает высокую доступность содержащихся в них элементов-примесей, среди которых самым распространенным является двухвалентное железо.

Более высокое количество железа в уральской зоне согласуется со значительной концентрацией здесь тектонических дислокаций. Согласно шарьяжно-надвиговой теории [20], в приконтактных зонах тектонических пластин происходит нарушение сплошности покровных структур, что способствует повышению биодоступности заключенных в породах элементов-примесей. Кроме того, в результате горизонтальных движений литосферы происходит выведение на дневную поверхность богатых металлами тяжелых (ультрасосновных) пород океанической коры, излияние лав с формированием магматических пород, которые также отличаются высокой концентрацией элементов-примесей. Разрушение и выветривание минералов, слагающих эти породы, повышает содержание химических элементов в окружающей среде. Выведение на земную поверхность глубинных пород под действием тектонических движений является, по-видимому, важнейшим механизмом формирования элементного статуса биосферы, при отсутствии которого за миллионы лет все бо-

лее тяжелые минералы оказались бы погружены под многокилометровые толщи более легких минералов и доступность первых была бы невозможна.

Повышение биодоступности микроэлементов в зонах разрывной тектоники установлено многими авторами. Исследования на Западном Урале и в Приуралье обнаружили большое количество геохимических аномалий (Pb, Zn, Cd, Be, P и др.), приуроченных к геодинамически активным зонам [21]. Зоны разрывных нарушений характеризуются повышенной мобильностью воды, микроэлементов, радионуклидов и др., что подтверждается совпадением аномалий повышенной радиоактивности Подстепнянского месторождения гранитоидов Украинского щита с системой трещиноватости и с Шолоховско-Ингулецким разломом [22].

Следует отметить, что с геологической точки зрения повышение содержания химических элементов в зоне Урала связано также с выходами на дневную поверхность богатых микроэлементами вулканогенных пород, гипербазитов, представляющих собой породы верхней мантии земли с концентрацией железа до 12 %, а также карбонатных пород, отличающихся, как отмечалось выше, высокой доступностью элементов-примесей.

Средняя распространенность СД2 составила 1773 случая на 100 000 человек. Минимальные показатели зарегистрированы в уральских районах – 906 и 1036 на 100 000, а максимальный – в западной части РБ – 2845 на 100 000 жителей соответственно.

По результатам картирования распространенности СД2 на территории республики также было выделено 3 кластера, территориально совпадающих с выделенными выше геохимическими зонами, – группа районов с высокими показателями на западе (западный), а также две другие группы с относительно низкими показателями на севере (северный) и в зоне Южного Урала (уральский).

Так, в западном кластере (27 районов с населением 1 153 523 человека) распространенность СД2 оказалась в 1,4 ($p=0,000071$) и 1,7 ($p=0,000004$) раза выше по сравнению с северным и уральским кластерами соответственно и составила 1931 человек на 100 000 жителей. В северном кластере (11 районов с населением 271 921 человек) и уральском (6 районов с населением 278 992) распространенность СД2 составила соответственно 1334 и 1155 на 100 000 населения (рис. 2).

Следует подчеркнуть, что распространенность СД2 в западной части РБ значительно варьировала – от сравнительно низкой – 1268, 1378 на 100 000 жителей, до высокой – 2845, 2300, 2253 на 100 000 жителей. Выявленный разброс показателей также согласуется с особенностями геологического строения запада республики, где развитие пород континентального генезиса обуславливает мозаичное распределение химических элементов в зависимости от рельефа и палеорельефа местности.

Обнаруженное снижение распространенности СД2 в зоне развития карбонатных пород согласуется со сведениями литературы о позитивном влиянии известняков на состояние растительного и животного мира, здоровье населения, которое связывают с высокой доступностью содержащихся в карбонатах элементов-примесей, а также с повышенным содержанием кальция и магния [2, 23–25]. О.А. Денисовой с соавторами установлена протективная роль кальция в патологии щитовидной железы [26]. Кроме того, на севере РБ отмечается относительно равномерная распространенность СД2 в соответствии с равномерным распределением элементов-примесей по площади в этой зоне, обусловленным развитием здесь пород морского происхождения.

Особый интерес, на наш взгляд, представляют результаты исследования в горной части республики, где имеет место высокая концентрация тектонических нарушений (надвигов, сдвигов и др.) [27].

По данным литературы, избыток химических элементов в зонах тектонической активности ассоциируется с повышенным риском развития целого ряда заболеваний. Так, по данным С.И. Галяутдиновой и соавт. [28], проживание в непосредственной близости от разлома повышает риск психических и онкологических заболеваний. Среди населения Литовской Республики установлена роль геопатогенных зон в развитии ишемической болезни сердца, сахарного диабета, гипертонической болезни, заболеваний желудочно-кишечного тракта и почек, рака мочевого пузыря, генетических нарушений [29].

Вместе с тем результаты анализа распространенности СД2 на территории Южного Урала выглядели на первый взгляд парадоксальными – уральский кластер характеризовался наименьшей распространенностью заболевания по сравнению с северным и западным. Полученные данные позволяют предполагать возможность благоприятного влияния геодинамически активных зон на состояние здоровья населения, возможно, обусловленное особенностями элементного статуса [18].

Результаты исследования согласуются со сведениями о влиянии тектонической активности на развитие человеческой цивилизации. Так, большинство мест зарождения древнейшего земледелия в восточной части Средиземноморья и на Ближнем Востоке приурочено к зонам активных разломов, что объясняется их позитивной ролью в формировании богатого разнообразия диких предков культурных растений [30].

Следует отметить, что в Учалинском районе (восток РБ), расположенном в горной части республики, распространенность СД2 оказалась сравнительно высокой – 2509 случаев на 100 000 жителей. Однако неблагоприятная ситуация в данном районе объясняется влиянием техногенного фактора. Более высокая общая заболеваемость взрослого населения в Учалинском районе по сравне-

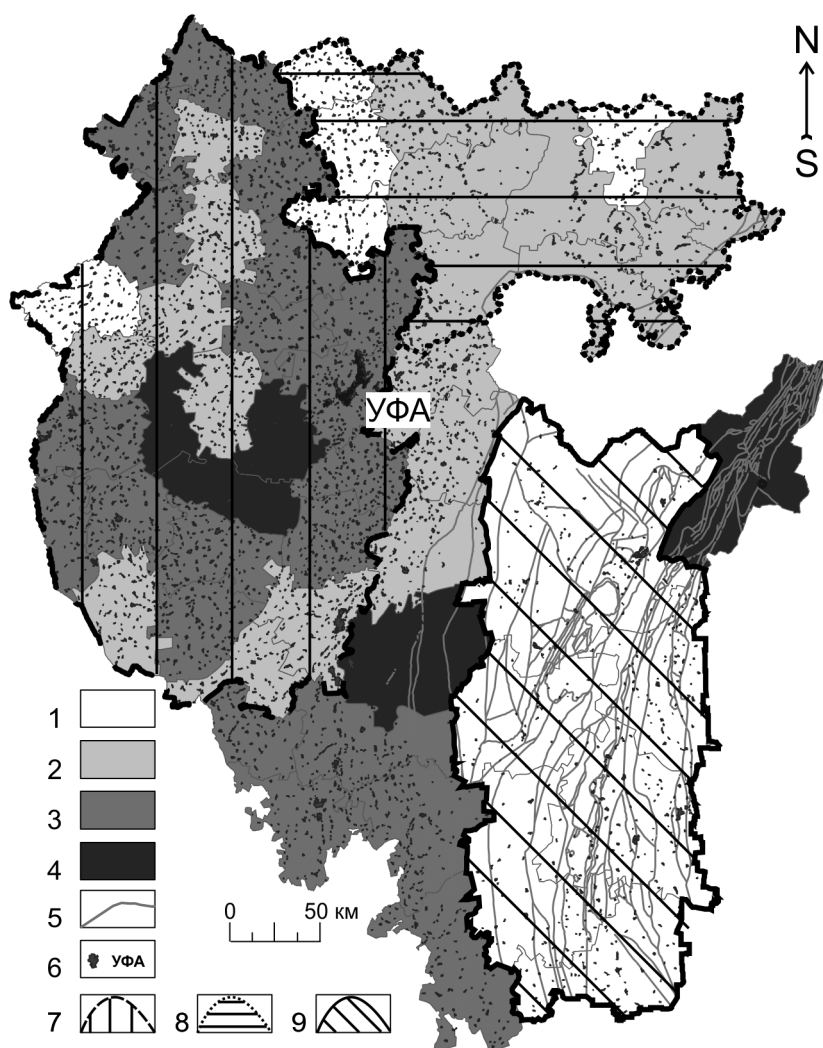


Рис. 2. Распространенность сахарного диабета 2-го типа в Республике Башкортостан: 1–4 – распространенность СД2 на 100 000 человек (классифицировано по принципу «natural breaks»): 1 – 905–1277; 2 – 1278–1745; 3 – 1746–2213; 4 – 2214–2844; 5 – тектонические нарушения; 6 – населенные пункты; 7 – западный кластер; 8 – северный кластер; 9 – уральский кластер

Fig. 2. Type 2 diabetes prevalence in the Republic of Bashkortostan: 1–4 is the number of cases of type 2 diabetes per 100000 («natural breaks» classification): 1 – 905–1277; 2 – 1278–1745; 3 – 1746–2213; 4 – 2214–2844; 5 are the tectonic faults; 6 are the settlements; 7 is the western cluster; 8 is the northern cluster; 9 is the Uralian cluster

нию с республикой связана с негативным воздействием горно-обогатительного комбината, вокруг которого в радиусе 4?6 км и более установлены превышения ПДК цинка в 50 раз, свинца в 20, кадмия и меди в 10 раз [31–33].

Полученные нами результаты свидетельствуют о том, что направленность биологического влияния приразломных зон зависит от целого комплекса факторов – структуры и состава пород, их плотности, проницаемости и т. д., определяющих элементный статус местности. Обогащение почвы химическими элементами в зоне разломов может позитивно влиять на биосферу, в то время как выраженный избыток вызывает негативные эффекты. Выявленное благоприятное влияние относительно

более высокого уровня железа и бериллия в почве на распространенность сахарного диабета свидетельствует о перспективности более детальных исследований роли данных химических элементов в регуляции углеводного обмена.

Выводы

Проведенные исследования установили согласованность региональных геологических условий с закономерностями распределения элементов-примесей в почве и распространенностью сахарного диабета среди населения.

Зоны развития пород морского генезиса (карбонатные породы), а также территории с высокой концентрацией тектонических дислокаций

обуславливают более высокий уровень железа и бериллия в почве за счет повышения доступности данных химических элементов.

Повышение содержания железа и бериллия в местности проживания ассоциируется с уменьшением распространенности сахарного диабета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эколого-геохимические особенности природных сред Томского района и заболеваемость населения / Л.П. Рихванов, Е.Г. Язиков, Ю.И. Сухих, Н.В. Барановская, В.Т. Волков, Н.Н. Волкова, В.В. Архангельский, Т.А. Архангельская, О.А. Денисова, А.Ю. Шатилов, Е.П. Янкович. – Томск: ТПУ, 2006. – 216 с.
2. Фархутдинова Л.М., Сперанский В.В., Гильманов А.Ж. Микроэлементы волос у больных с зобом // Клиническая лабораторная диагностика. – 2006. – № 8. – С. 19–21.
3. Medical geochemistry research in SGR / S. Rapant, V. Cveckova, Z. Dietzova, M. Letkovicova, M. Khun // Environmental Geochemistry and Health. – 2009. – № 31 (1). – P. 11–25.
4. Состояние компонентов природной среды Томской области по данным эколого-геохимического мониторинга и здоровье населения / Л.П. Рихванов, Е.Г. Язиков, Н.В. Барановская, А.М. Беляева, Л.В. Жорняк, А.В. Таловская, О.А. Денисова, Ю.И. Сухих // Безопасность жизнедеятельности. – 2008. – № 1. – С. 29–37.
5. Рихванов Л.П., Барановская Н.В., Судыко А.Ф. Химические элементы в организме человека как основа для реализации идей медицинской геологии // Горный журнал. – 2013. – № 3. – С. 37–42.
6. Региональные биогеохимические особенности накопления химических элементов в зольном остатке организма человека / Т.Н. Игнатова, Н.В. Барановская, Л.П. Рихванов, А.Ф. Судыко // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 1. – С. 178–183.
7. Aggett P.J. Physiology and metabolism of essential trace elements: an outline // Clinics in endocrinology and metabolism. – 1985. – V. 14. – № 3. – P. 513–543.
8. Микроэлементозы человека / А.П. Авцын, А.А. Жаворонков, М.А. Риш, Л.С. Строчкова. – М.: Мир, 1991. – 495 с.
9. The effects of calcium and vitamin D supplementation on blood glucose and markers of inflammation in nondiabetic adults / A.G. Pittas, S.S. Harris, P.C. Stark, V. Dawson-Hughes // Diabetes care. – 2007. – № 30(4). – P. 980–986.
10. Фархутдинова Л.М., Байбурина Г.Г., Фархутдинов И.М. Сахарный диабет: на стыке медицины и геоэкологии // Медицинский вестник Башкортостана. – 2010. – Т. 5. – № 4. – С. 15–19.
11. Фархутдинова Л.М., Байбурина Г.Г., Фархутдинов И.М. Сахарный диабет: проблемы, достижения, перспективы // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. – 2010. – Т. 15. – № 3. – С. 32–39.
12. Аскарова Я.Н. Региональные особенности содержания и соотношения некоторых микроэлементов (йода, меди, свинца и марганца) во внешней среде и их значение в развитии зобной эндемии в Башкирии: автореф. дис. ... д-ра мед. наук. – Л., 1969. – 28 с.
13. Фаттахутдинов С.Г. Роль геологических формаций в формировании неблагоприятной геоэкологической ситуации, обуславливающей повышенную заболеваемость населения раком // Ежегодник-1993: Информационные материалы Уфимского научного центра РАН. – Уфа, 1994. – С. 82–85.
14. Белан Л.Н. Геоэкология горнорудных районов Башкортостана. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2003. – 176 с.
15. Старова Н.В. Содержание химических элементов в волосах человека // В кн.: Проблемы экологии: Принципы их решения на примере Южного Урала. – М.: Наука, 2003. – С. 159–162.
16. Геологическая карта Башкирской АССР. Масштаб 1:600000 / под ред. М.А. Камалетдинова. – Уфа, 1980. – 1 л.
17. Фархутдинов И.М., Фархутдинова Л.М. Влияние геологических факторов на развитие сахарного диабета на примере Республики Башкортостан // Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов Академии наук Республики Башкортостан. – 2014. – № 20. – 2014. – С. 85–88.
18. Фархутдинов И.М., Фархутдинова Л.М. О влиянии геотектонических факторов на состояние здоровья населения // Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов Академии наук Республики Башкортостан. – 2015. – № 21. – С. 132–135.
19. Криночкин Л.А., Шкарин А.Б. Составление геохимических основ масштаба 1:1000 000 листов N-40,41,42, P-45,52,55,57, O-38,55,56. – М.: Росгеолфонд, 2011. – 178 с.
20. Камалетдинов М.А. Современная теория шарьяжей // Геологический Сборник ИГ УНЦ РАН. – 2001. – № 2. – С. 29–37.
21. Копылов И.С. Геоэкологическая роль геодинамических активных зон // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 7. – С. 67–71.
22. Неотектонические движения как фактор, определяющий радиационно-гигиенические свойства гранитов / Ю.Л. Ахкозов, Е.Ю. Грицай, В.М. Загорский, А.В. Моисеенко // Геолого-Минералогичний Вісник. – 2008. – № 2 (20). – С. 4–11.
23. Шварц А.А. Экологическая гидрогеология. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 1996. – 60 с.
24. Бахтиярова К.З., Фархутдинова Л.М., Магжанов Р.В. Геоэкологические аспекты рассеянного склероза в Республике Башкортостан // Экология человека. – 2007. – № 9. – С. 3–6.
25. The potential impact of geological environment on health status of residents of the Slovak Republic / S. Rapant, V. Cveckova, Z. Dietzova, K. Fajcikova, E. Hiller, R. Finkelman, S. Skultetyova // Environ Geochem Health. – 2013. – V. 36. – № 3. – P. 543–561.
26. Проблема патологии щитовидной железы с позиций геоэкологии и геохимии / О.А. Денисова, Н.В. Барановская, Л.П. Рихванов, Г.Э. Черногорюк, Е.В. Калянов // Разведка и охрана недр. – 2011. – № 8. – С. 60–63.
27. Камалетдинов М.А. К вопросу о покровной тектонике Урала в свете новых данных // Геотектоника. – 1965. – № 1. – С. 106–117.
28. Галютдинова С.И., Белан Л.Н., Гумерова Р.В. К вопросу о влиянии зон биологического дискомфорта на человека // Вестник Башкирского университета. – 2012. – Т. 17. – № 3. – С. 1403–1406.
29. Пронин А.П., Вольфсон И.Ф., Одерова А.В. Флюидная активность земли и среда обитания, биогеохимические провинции, геопатогенные зоны, геоэкология человека // Медицинская геология: состояние и перспективы. – М.: Росгео, 2010. – С. 24–37.
30. Trifonov V.G., Karakhanian A.S. Active faulting and human environment // Tectonophysics. – 2004. – V. 380. – № 3–4. – P. 287–294.

Авторы выражают благодарность ведущему геологу ООО «ВашНИПИнефть» О.Ю. Князевой и руководителю Государственного регистра больных сахарным диабетом Медицинского информационно-аналитического центра Министерства здравоохранения РБ к.м.н. Г.Г. Байбуриной за содействие в работе.

31. Белан Л.Н. Медико-биологические особенности горнорудных районов // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2005. – № 5. – С. 112–117.
32. Белан Л.Н. Об экологической опасности колчеданных месторождений // Вестник ОГУ. – 2006. – № 4. – С. 115–120.
33. Особенности загрязнения среды обитания и заболеваемость населения в горнодобывающем регионе Республики Башкортостан / З.С. Терегулова, Л.Н. Белан, Р.А. Аскаров, З.Ф. Терегулова, А.И. Алтынбаева // Медицинский Вестник Башкортостана. – 2009. – Т. 4. – № 6. – С. 20–25.

Поступила 13.01.2016 г.

Информация об авторах

Фархутдинов И.М., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и геоморфологии Башкирского государственного университета; младший научный сотрудник Института геологии Уфимского научного центра Российской академии наук.

Фархутдинова Л.М., доктор медицинских наук, профессор кафедры терапии и общей врачебной практики Института последипломного образования Башкирского государственного медицинского университета.

Суфияров Р.С., доктор медицинских наук, директор Медицинского информационно-аналитического центра Республики Башкортостан.

UDC 504:551.24

REGIONAL GEOLOGICAL FACTORS AND DIABETES

Iskhak M. Farkhutdinov¹,
iskhakgeo@gmail.com

Leyla M. Farkhutdinova²,
farkhutdinova@gmail.com

Rinat S. Sufiyarov³,
sufiyarovrs@doctorrb.ru

¹ Bashkir State University, Institute of Geology at Ufa Scientific Center Russian of the Academy of Sciences, 32, Zaki Validi street, Ufa, Republic of Bashkortostan, 450076, Russia.

² Bashkir State Medical University, 3, Lenin street, Ufa, Republic of Bashkortostan, 450076, Russia.

³ Medical Information and Analytical Center of the Republic of Bashkortostan, 48, Zaki Validi street, Ufa, 450057, Russia.

Chemical composition of soils is influenced by both natural phenomena, such as destruction of rocks, and man-made factors associated with disposal of oil waste and ore processing plants. The relevance of the discussed issue is caused by the wide distribution of diabetes and its social and medical importance. A great variety of geological structures (platform foredeep, folded region) and rocks (sedimentary, volcanic, igneous, metamorphic rocks of different composition, structure and age) on the territory of the Republic of Bashkortostan determines the regional characteristics of microelement profile of the biosphere, the region can be used as a unique scientific testing ground to study the medical and biological role of geological factors.

The main aim of the research is to study the effect of geological factors and features of microelement composition of terrain on development of diabetes.

The methods used in the study. The authors have used the results of soil testing for the content of 45 chemical elements in different geological areas, estimated the prevalence of diabetes in the Republic of Bashkortostan according to the data of the diabetes register for 2010–2014 depending on geological conditions of the area; plotted the prevalence map using the program ArcGIS 10.2, the method of classification is «natural breaks».

The results. The paper demonstrates the consistency of the regional geological conditions with the features of the elemental composition of terrain and the prevalence of diabetes. The areas of carbonate rocks and the increased concentration of tectonic dislocations are associated with increase in the iron and beryllium content in the soil and decrease of the disease prevalence. The territory with the rocks of continental origin is characterized by the decrease in iron and beryllium level in the soil and relative increase in the prevalence of diabetes.

Key words:

Diabetes mellitus, geo-ecology, minerals, medical geology, geotectonics, faults, Ural, environment.

The authors thank O.Yu. Knyazeva, the chief geologist of «BashNIPIneft», and G.G. Bayburina, Cand. Sc., the head of the State register of the diabetes patients at the Medical information analytical center of the Ministry of Health in the Republic of Bashkortostan, for research assistance.

REFERENCES

- Rikhvanov L.P., Yazikov E.G., Sukhikh I.I., Baranovskaya N.V., Volkov V.T., Volkova N.N., Arkhangelskii V.V., Arkhangelskaia T.A., Denisova O.A., Shatilov A.I., Yankovich E.P. *Ekologo-geokhimicheskie osobennosti prirodnykh sred Tomskogo rayona i zabolevaemost naseleniya* [Ecological and geochemical features of the natural environments in Tomsk region and morbidity]. Tomsk, TPU Publ. house, 2006. 216 p.
- Farkhutdinova L.M., Speranskii V.V., Gilmanov A.Zh. Trace elements of hair in patients with goiter. *Klinicheskaya laboratornaya diagnostika*, 2006, no. 8, pp. 19–21. In Rus.
- Rapant S., Cveckova V., Dietzova Z., Letkovicova M., Khun M. Medical geochemistry research in SGR. *Environmental Geochemistry and Health*, 2009, no. 31 (1), pp. 11–25.
- Rikhvanov L.P., Yazikov E.G., Baranovskaya N.V., Belyaeva A.M., Zhorniyak L.V., Talovskaya A.V., Denisova O.A., Sukhikh I.I. State of environmental components in Tomsk region according to the ecological and geochemical monitoring and health. *Bezopasnost zhiznedeyatelnosti*, 2008, no. 1, pp. 29–37. In Rus.
- Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Sudyko A.F. Chemical elements in human body as the basis for implementation of medical geology ideas. *Gornyi zhurnal*, 2013, no. 3, pp. 37–42. In Rus.
- Ignatova T.N., Baranovskaya N.V., Rikhvanov L.P., Sudyko A.F. Regional geochemical features of chemical elements accumulation in ash residue of human body. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 317, no. 1, pp. 178–183. In Rus.
- Aggett P.J. Physiology and metabolism of essential trace elements: an outline. *Clinics in endocrinology and metabolism*, 1985, vol. 14, no. 3, pp. 513–543.
- Avtsyn A.P., Zhavoronkov A.A., Rish M.A., Strochkova L.S. *Mikroelementozy cheloveka* [Human microelementoses]. Moscow, Mir Publ., 1991. 495 p.
- Pittas A.G., Harris S.S., Stark P.C., Dawson-Hughes B. The effects of calcium and vitamin D supplementation on blood glucose

- and markers of inflammation in nondiabetic adults. *Diabetes care*, 2007, no. 30 (4), pp. 980–986.
10. Farkhutdinova L.M., Baiburina G.G., Farkhutdinov I.M. Diabetes mellitus. On the verge of medicine and geoeology. *Meditsinskii vestnik Bashkortostana*, 2010, vol. 5, no. 4, pp. 15–19. In Rus.
 11. Farkhutdinova L.M., Baiburina G.G., Farkhutdinov I.M. Diabetes: challenges, achievements, prospects. *Herald of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*, 2010, vol. 15, no. 3, pp. 32–39. In Rus.
 12. Askarova Ya.N. *Regionalnye osobennosti sodержaniya i sootnosheniya nekotorykh mikroelementov (ioda, medi, svintsa i margantsa) vo vneshney srede i ikh znachenie v razvitií zobnoy endemii v Bashkirií*. Dis. Dokt. nauk [Regional features and ratios of some micronutrients (iodine, copper, lead and manganese) in the environment and their importance in the development of goitrous endemic in Bashkiria. Doct. Diss.]. Leningrad, 1969. 28 p.
 13. Fattakhutdinov S.G. Rol geologicheskikh formatsii v formirovanií neblagopoluchnoy geokologicheskoy situatsii, obuslavlivayushchey povyshennuyu zabolvaemost naseleniya rakom [The role of geological formation in development of unfavorable geo-ecological situation, which causes the increase in incidence of cancer of the population]. *Ezhegodnik-1993: Informatsionnye materialy Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN*, 1994, pp. 82–85.
 14. Belan L.N. *Geokologiya gornorudnykh rayonov Bashkortostana* [Geoeology of mining areas of Bashkortostan]. Ufa, RITH BashGU Publ., 2003. 176 p.
 15. Starova N.V. Soderzhanie khimicheskikh elementov v volosakh cheloveka [The content of chemical elements in human hair]. *Problemy ekologii: printsipy ikh resheniya na primere Yuzhnogo Urala* [Ecological problems: methods of their solving by the example of Southern Ural]. Moscow, Nauka Publ., 2003. pp. 159–162.
 16. *Geologicheskaya karta Bashkirskoy ASSR* [Geological map of the Bashkir Autonomous Soviet Socialist Republic]. Masshtab 1:600000. Ed. by M.A. Kamaletdinov. Ufa, 1980.
 17. Farkhutdinov I.M., Farkhutdinova L.M. Vliyaniye geologicheskikh faktorov na razvitiye sakharnogo diabeta na primere Respubliki Bashkortostan [Influence of geological factors on the development of diabetes by the example of the Republic of Bashkortostan]. *Geologiya. Izvestiya Otdeleniya nauk o Zemle i prirodnykh resursov Akademii nauk Respubliki Bashkortostan*, 2014, no. 20, pp. 85–88.
 18. Farkhutdinov I.M., Farkhutdinova L.M. O vliianii geotektonicheskikh faktorov na sostoyaniye zdorovya naseleniya [On the influence of tectonic factors on population health]. *Geologiya. Izvestiya Otdeleniya nauk o Zemle i prirodnykh resursov Akademii nauk Respubliki Bashkortostan*, 2015, no. 21, pp. 132–135.
 19. Krinochkin L.A., Shkarin A.B. *Sostavleniye geokhimicheskikh osnov masshtaba 1:1000000 listov N-40,41,42, P-45,52,55,57, O-38,55,56* [Preparation of chemical bases of the scale of 1:1000000 pages N-40,41,42, P-45,52,55,57, O-38,55,56]. Moscow, Rosgeolfond Publ., 2011. 178 p.
 20. Kamaletdinov M.A. Sovremennaya teoriya sharyazhey [The modern theory of thrusts]. *Geologicheskii Sbornik IG UNTS RAN*, 2001, no. 2, pp. 29–37.
 21. Kopylov I.S. Geoeological role of geodynamic active zones. *Mezhdunarodny zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*, 2014, no. 7, pp. 67–71. In Rus.
 22. Akhkozov Yu.L., Gritsai E.Yu. Neotektonicheskie dvizheniya kak faktor, opredelyayushchy radiatsionno-gigienicheskie svoystva granitov [Neotectonic movement as a determinant of radiation-hygienic properties of granites]. *Geologo-mineralogicheskii vestnik*, 2008, no. 2 (20), pp. 4–11.
 23. Shvarts A.A. *Ekologicheskaya gidrogeologiya* [Environmental hydrogeology]. St-Petersburg, St-Petersburg University Press, 1996. 60 p.
 24. Bakhtiyarova K.Z., Farkhutdinova L.M., Magzhanov R.V. Geoenvironmental aspects of multiple sclerosis in the Republic of Bashkortostan. *Human ecology journal*, 2007, no. 9, pp. 3–6. In Rus.
 25. Rapant S., Cveckova V., Dietzova Z., Fajcikova K., Hiller E., Finkelmann R., Skultetyova S. The potential impact of geological environment on health status of residents of the Slovak Republic. *Environ Geochem. Health*, 2013, vol. 36, no. 3, pp. 543–561.
 26. Denisova O.A., Baranovskaya N.V., Rikhvanov L.P., Chernogoryuk G.E., Kalyanov E.V. Thyroid pathology problem from the standpoint of geoeology and geochemistry. *Prospects and protection of mineral resources*, 2011, no. 8, pp. 60–63. In Rus.
 27. Kamaletdinov M.A. On the issue on the cover tectonics of the Urals, in the light of new data. *Geotectonics*, 1965, no. 1, pp. 106–117.
 28. Galyautdinova S.I., Belan L.N., Gumerova R.B. On the issue of the influence of biological discomfort on human areas. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*, 2012, vol. 17, no. 3, pp. 1403–1406. In Rus.
 29. Pronin A.P., Volfson I.F., Oderova A.V. Flyuidnaya aktivnost zemli i sreda obitaniya, biogeokhimicheskie provintsii, geopatogennye zony, geokologiya cheloveka [Fluid land activity and environment, biogeochemical province, geopathic zones, human geoeology]. *Meditsinskaya geologiya: sostoyaniye i perspektivy* [Medical geology: state and prospects]. Moscow, Rosgeo Publ., 2010. pp. 24–37.
 30. Trifonov V.G., Karakhanian A.S. Active faulting and human environment. *Tectonophysics*, 2004, vol. 380, no. 3–4, pp. 287–294.
 31. Belan L.N. Medical and biological features of mining areas. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta (OGU)*, 2005, no. 5, pp. 112–117. In Rus.
 32. Belan L.N. On the environmental hazard of pyrite deposits. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta (OGU)*, 2006, vol. 4, no. 6, pp. 20–25. In Rus.
 33. Teregulova Z.S., Belan L.N., Askarov R.A., Teregulova Z.F., Altynbaeva A.I. Features of environmental pollution and morbidity in the mining region of the Republic of Bashkortostan. *Meditsinskii Vestnik Bashkortostana*, 2009, vol. 4, no. 6, pp. 20–25. In Rus.

Received: 13 January 2016.

Information about the authors

Iskhak M. Farkhutdinov, Cand. Sc., associate professor, Bashkir State University; junior researcher, Institute of Geology of the Russian Academy of Sciences, Ufa Scientific Center.

Leyla M. Farkhutdinova, Dr. Sc., professor, Institute of Postgraduate Education, Bashkir State Medical University.

Rinat S. Sufiyarov, Dr. Sc., Medical Director, Center of the Republic of Bashkortostan.

УДК 621.318

ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМОВ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ХАОСА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ВЕТРО- И ГЕЛИОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Федоров Владимир Кузьмич¹,
k13201@rambler.ru

Федянин Виктор Викторович¹,
fedviktor2@gmail.com

¹ Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

Актуальность проводимых исследований определяется необходимостью повышения энергоэффективности преобразовательных устройств для нужд возобновляемой энергетики. К алгоритмам управления преобразователей постоянного напряжения, применяемых в гелио- и ветроэлектростанциях, предъявляются повышенные и зачастую противоречивые требования. Одним из путей решения задачи совершенствования этих алгоритмов может служить теория детерминированного хаоса.

Цель работы: исследование и создание системы управления для преобразователей постоянного напряжения, позволяющей работать как в периодическом режиме, так и в режиме детерминированного хаоса; создание физической модели преобразователя постоянного напряжения, включающего в себя систему управления, работающую в режиме детерминированного хаоса, а также разработка контура обратных связей по напряжению для стабилизации выходного напряжения на заданном уровне.

Метод исследования. Проведен обзор патентных и литературных источников по данной теме. Использован математический и экспериментальный метод исследования преобразователей постоянного напряжения. Метод математического моделирования основан на составлении решения уравнений электрических систем. Метод экспериментального исследования основан на изучении выходных диаграмм, снятых с физической модели преобразователей постоянного напряжения.

Результаты. Создана физическая модель преобразователя постоянного напряжения с системой управления, работающей в режиме детерминированного хаоса. Полученные в ходе исследования результаты, показывают, что способ управления преобразователем постоянного напряжения с помощью детерминированного хаоса уменьшает электромагнитные помехи, а также значительно повышает энергоэффективность. Результаты, полученные в ходе исследования, могут быть использованы как на стадии проектировки источников питания такого класса, так и для проведения дальнейших исследований и разработок новых систем управления, включающих в себя управление с помощью детерминированного хаоса.

Ключевые слова:

Детерминированный хаос, преобразователь постоянного напряжения, система управления, бифуркация, динамический хаос.

Введение

В настоящее время в мире бурно развивается альтернативная энергетика, в первую очередь это ветро- и гелиоэлектростанции. Важным отличием процессов преобразования энергии в таких электростанциях является их нестационарный характер. Это в первую очередь связано с такими природными факторами, как изменение скорости ветра, суточные и погодные колебания уровня освещенности поверхности Земли и т. д. Для стабилизации процессов энергопреобразования большое распространение получили DC-DC-конвертеры. Нестационарный характер входного напряжения, поступающего на вход DC-DC-конвертеров, затрудняет разработку алгоритмов управления преобразователями. По мнению авторов, в этом случае будет вполне естественным обратиться к специальному разделу теории автоматического управления, так называемой теории детерминированного хаоса.

В 1963 году Эдвард Лоренц открыл режимы детерминированного хаоса в атмосферных явлениях. В математическом аспекте детерминированный хаос означает аперiodическое поведение системы, которое очень чувствительно к начальным условиям и долговременное прогнозирование точного решения становится невозможным. В сущности,

математическая модель хаотической электротехнической системы представляет собой детерминированную систему нелинейных дифференциальных уравнений, решение которой ведет себя непредсказуемым образом в зависимости от заданных начальных условий, – такой тип называется режимом детерминированного хаоса [1–4]. Следовательно, режимы детерминированного хаоса – это новый тип и особая форма поведения нелинейной системы, и для электротехнической системы обнаружение хаотических режимов является актуальной задачей.

Принято считать, что детерминированный хаос – определенно недопустимое явление с точки зрения динамической устойчивости в электротехнической системе. В частности, когда колебания в системе приобретают хаотический характер, система теряет устойчивость и возникает аварийный режим работы.

В преобразовательной технике процессы, изменяющиеся случайным образом, в основном ухудшают работу системы. И основная задача разработчика в таких случаях заключается в исключении возникновения хаотических процессов в системе. Явление перехода к хаотическому поведению происходит из-за нелинейных элементов, входящих в

состав преобразователей. Вопросы, посвященные данному режиму, подробно рассмотрены в отечественной и зарубежной литературе [5–10].

Система управления (СУ) преобразователями электрической энергии реализуется с помощью аналоговых или цифровых систем управления, причем в аналоговых системах переход к импульсному режиму работы осуществляется с помощью модулятора (например, широтно-импульсного – ШИМ), также применяются смешанные системы управления. Системы управления преобразовательной техники не стоят на месте – появляются различные типы контроллеров, расширяются возможности выходных драйверов для управления силовым ключом, появляются новые источники опорного напряжения и многое другое [11–16].

С учетом вышеизложенного в статье предпринята попытка извлечь определенную выгоду из хаоса и использовать его в силовой электронике.

Система формирования периодического и хаотического режима работы

Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) построена на сравнении сигнала рассогласования с модулирующим сигналом пилообразной формы. В результате на выходе формируется сигнал управления прямоугольной формы. Очевидно, для того чтобы исследовать преобразователь, работающий в периодическом и хаотическом режиме, необходимо осуществить хаотическое либо периодическое изменение ширины импульса управления. Принципиально хаотический метод управления можно осуществить несколькими методами: первый заключается в изменении параметров схемы и нахождении бифуркационного режима, который впоследствии приведет к хаосу, а второй заключается в добавлении внешней схемы управления, позволяющей осуществить хаотическую широтно-импульсную модуляцию. И если первый метод труднодостижим на практике, то второй вполне

осуществим и основан на классическом методе сравнения двух сигналов.

На рис. 1 показана схема, на выходе которой возможно сформировать периодический и хаотический ШИМ-сигнал, необходимый для сравнения режимов работы преобразователя.

Процесс формирования управляющих импульсов

Рассмотрим процесс формирования периодических и хаотических импульсов. В момент времени, когда на вход (А) элемента U7C поступает логическая единица, на сбрасывающий вход (R) триггера действует логический ноль, следовательно, триггер не находится в режиме сброса. Если в этот момент времени напряжение на инвертирующем входе усилителя ошибки U9 будет ниже опорного V7 (1,25 В), то на выходе усилителя появится логическая единица, которая поступит на вход (B). Это повлечет за собой установку в логическую единицу элемента U7C и вызовет переключение триггера. В результате на выходе системы управления будет действовать логическая единица. Напротив, когда на входе (А) действует логический ноль, на сбрасывающем (R) входе триггера действует логическая единица. Это вызывает сброс триггера и закрытие логического элемента U7C. Можно сказать, что схема в этом состоянии не пропускает сигналы, следующие от усилителя ошибки. Следовательно, на выходе схемы в этом случае будет действовать логический ноль. Необходимо отметить, что в таком исполнении схемы процесс формирования управляющих импульсов будет зависеть от сигнала, поступающего на вход (А) логического элемента. Другими словами, если сигнал, поступающий на вход (А) будет изменяться периодически, то на выходе схемы сформируется периодический ШИМ, и наоборот: если на вход (А) будет подаваться сигнал от источника детерминированного хаоса, то на выходе сформируется ШИМ, изменяющийся хаотическим образом. Диаграммы работы формирователя показаны на рис. 2.

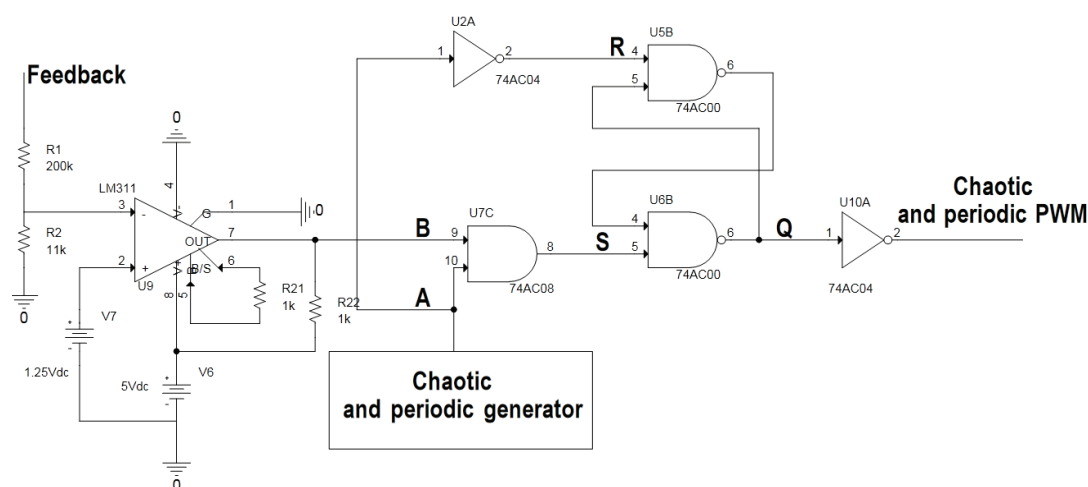


Рис. 1. Базовая схема СУ формирователя ШИМ-сигнала

Fig. 1. Basic scheme of the control system of a pulse width modulation (PWM) signal

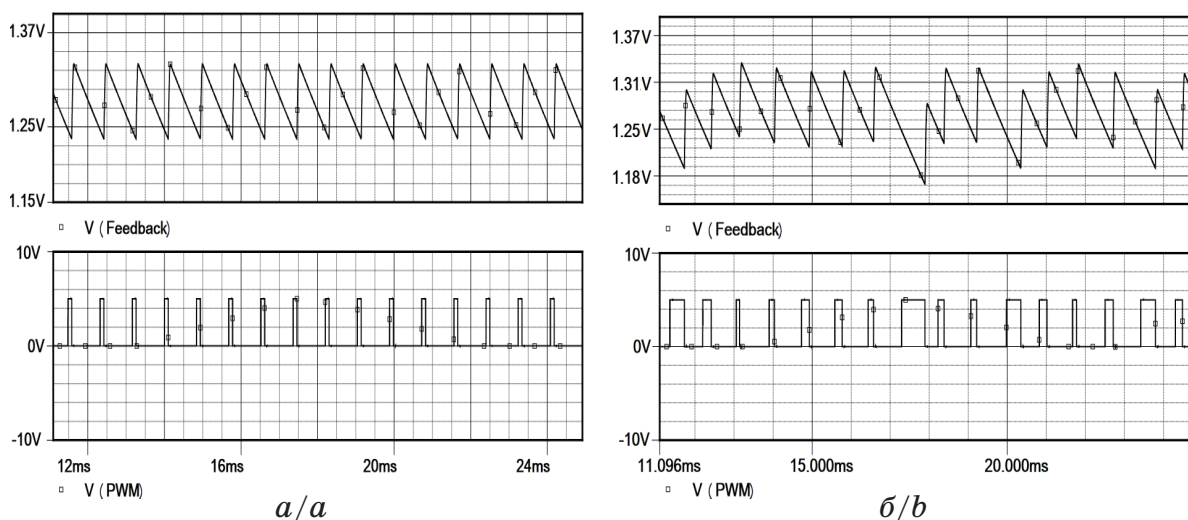


Рис. 2. Формирование управляющих импульсов при периодическом сигнале задающего генератора (а) и при хаотическом сигнале задающего генератора (б)

Fig. 2. Formation of control pulses at periodic signal of driving generator (a) and chaotic signal of the master oscillator (b)

На данном рисунке можно рассмотреть, как формируется ШИМ-последовательность периодического и хаотического сигнала. пилообразный сигнал, поступающий на инвертирующий вход усилителя ошибки, сравнивается с опорным напряжением, в результате при пересечении пилообразного сигнала и постоянного опорного напряжения происходит формирование длительности управляющего импульса.

Разработанные схемы для исследования периодического и хаотического режима работы преобразователя

Исследования режимов хаотической и периодической работы понижающих преобразователей проводились с использованием микросхемы МС34063А. Микросхема имеет в своем составе

транзисторный ключ VT, который соединен со схемой управления, также в нее включен усилитель ошибки, на который через делитель напряжения подается сигнал обратной связи и ограничитель входного тока. Данная микросхема была выбрана из-за того, что ее система формирования управляющего сигнала схожа с системой, показанной на рис. 1. Основным изменением стандартной схемы включения, показанной на рис. 3, является то, что вместо времязадающего конденсатора, подключенного к выводу 3, подключается генератор с периодическими или хаотическими тактовыми импульсами. Таким образом, появилась возможность исследовать работу преобразователя, не прибегая к сложным схематическим изменениям.

В таком исполнении схемы можно получить выходное напряжение качественно ниже входно-

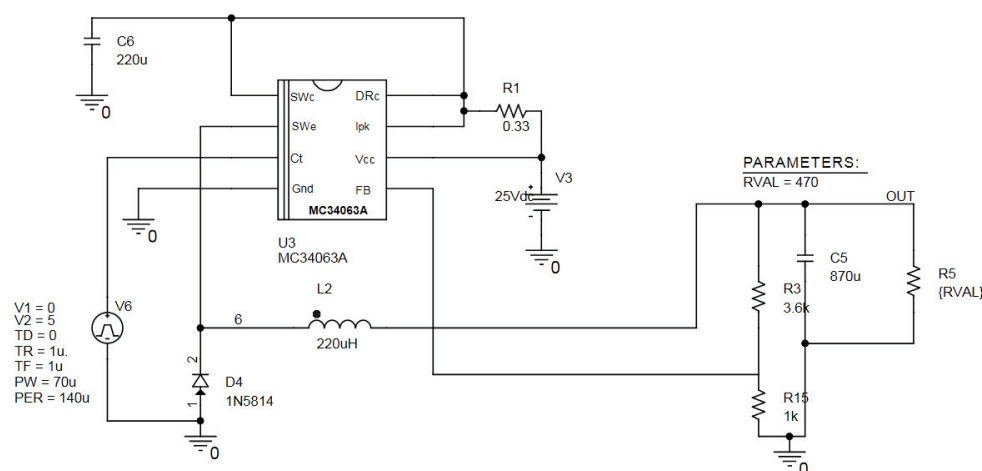


Рис. 3. Понижающий преобразователь постоянного напряжения с внешним периодическим генератором тактовых импульсов

Fig. 3. Step-down DC-DC converter with external periodic clock generator

го, причем расчетные мощности входящих в нее элементов значительно ниже, чем у повышающего преобразователя или инвертирующего.

Управление транзистором VT осуществляется системой управления, которая формирует управляющие импульсы длительностью $t_{и}$ и периодом T . Напряжение от источника V6 задает тактовую частоту преобразователя и изменяется периодически.

На вход преобразователя действует постоянное напряжение величиной 25 В.

Так как преобразователь понижающий, то величина выходного напряжения составляет 5 В. В установившемся режиме, при неизменном питающем напряжении, выходное напряжение преобразователя будет пропорционально относительной длительности открытого состояния транзистора или пропорционально коэффициенту регулирования. Выходное напряжение можно определить по следующей формуле:

$$U_{\text{вых}} = \gamma U_{\text{вх}}, \quad (1)$$

где $\gamma = t_{и}/T$ – коэффициент регулирования.

Когда встроенный в микросхему транзистор VT находится в режиме насыщения продолжительностью $t_{\text{вкл}}$, входное напряжение прикладывается на вход LC-фильтра.

Ток через индуктивность в это время линейно нарастает и определяется по формуле

$$i_{\text{вкл}} = \frac{(U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}}) \cdot t_{\text{вкл}}}{L} + i_{\text{вх}}. \quad (2)$$

Энергия, запасенная индуктивностью в течение этого периода, равна:

$$W = \frac{L(i_{\text{max}} - i_{\text{min}})^2}{2}. \quad (3)$$

Когда транзистор VT находится в режиме отсечки, напряжение на входе LC-фильтра стремится к нулю и в этот момент времени открывается диод VD, который продолжает проводить ток в прежнем направлении. В результате формируется локальный контур, состоящий из диода, индуктивности и нагрузки. Ток, протекающий в индуктивности, описывается следующей формулой:

$$i_{\text{выкл}} = i_{\text{max}} - \frac{U_{\text{вых}} \cdot t_{\text{выкл}}}{L}, \quad (4)$$

где $t_{\text{выкл}}$ – время, при котором транзистор VT находится в режиме отсечки.

Принципиальная схема источника питания, работающего в режиме детерминированного хаоса, изображена на рис. 4. Основное отличие от схемы, приведенной на рис. 3, заключается в добавлении генератора детерминированного хаоса, собранного по схеме Чуа.

Аналоговый сигнал со схемы Чуа преобразуется с помощью компаратора U4 в хаотическую последовательность импульсов логического уровня и поступает на вход микросхемы преобразователя. В результате преобразователь вместо привычного периодического режима начинает работать в режиме детерминированного хаоса (рис. 5).

Полученные результаты

Для сравнения двух систем сопоставим результаты, полученные в ходе исследования, и покажем, как изменяются выходные параметры преобразователя при периодическом и хаотическом формировании сигнала управления (рис. 6).

Если проводить спектральный анализ напряжений, то для периодического сигнала (рис. 7, а)

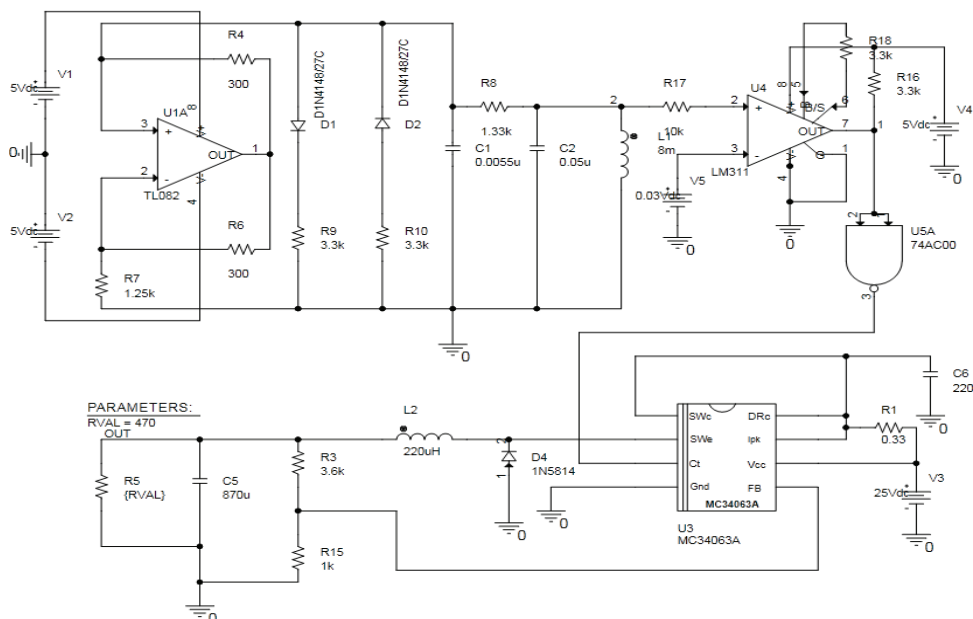


Рис. 4. Понижающий преобразователь постоянного напряжения с внешним генератором хаотических тактовых импульсов, реализованным по схеме Чуа

Fig. 4. Step-down DC-DC converter with external generator of chaotic clock pulses, realized by the Chua scheme

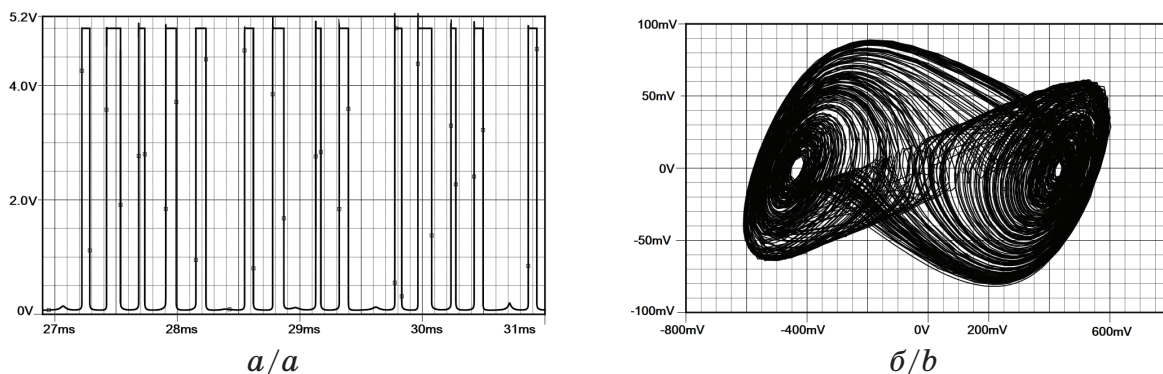


Рис. 5. Хаотическая последовательность импульсов на выходе компаратора U4 (а) и фазовый портрет генератора Чуа, снятый с емкости C1 и C2 (б)

Fig. 5. Chaotic sequence of pulses at the output of the comparator U4 (a) and phase portrait of the Chua generator taken from capacity C1 and C2 (b)

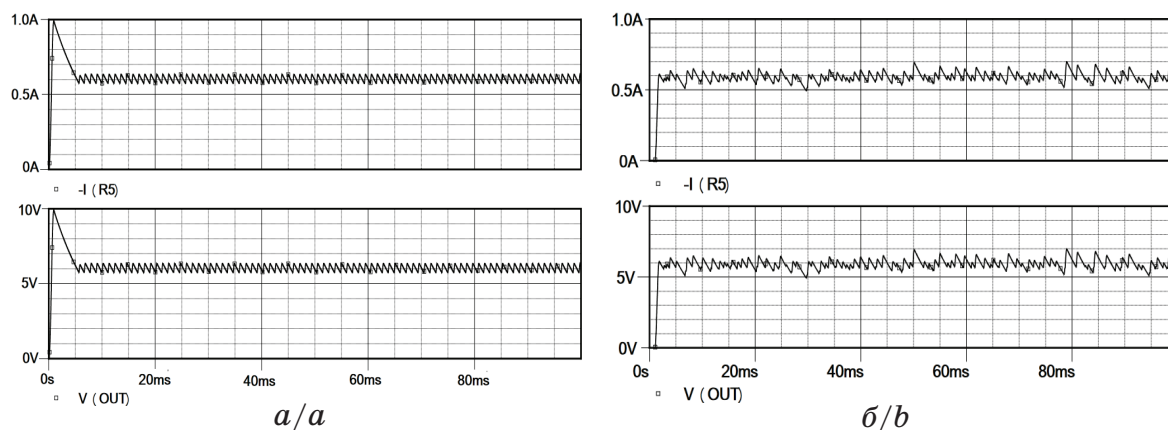


Рис. 6. Выходной ток и напряжение на нагрузке R5 при периодическом (а) и хаотическом (б) формировании ШИМ

Fig. 6. Output current and voltage on the load R5 at PWM periodic (a) and chaotic (b) formation

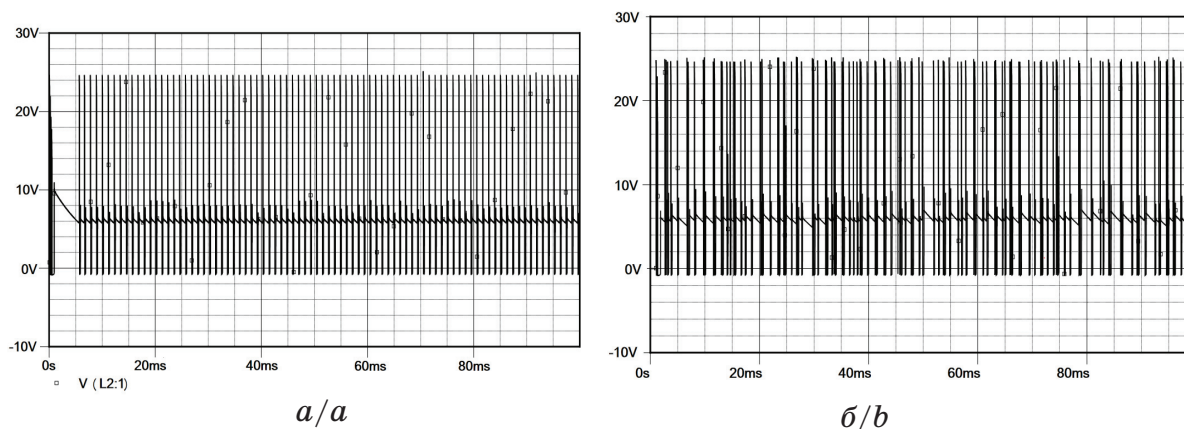


Рис. 7. Временная диаграмма напряжения, действующего на входе LC-фильтра при периодическом (а) и хаотическом (б) формировании ШИМ

Fig. 7. Timing diagram of voltage of the LC-filter operating on the input at PWM periodic (a) and chaotic (b) formation

спектр будет состоять исключительно из дискретных частотных составляющих. И это будет неотъемлемой частью системы находящейся в устойчивом равновесии [17–19]. Периодический режим представлен рядом Фурье, содержащим некоторую

составляющую с циклической частотой $f=1/T$ и гармоники, которые расположены равномерно с частотами kf , где $k=2,3,\dots$. При этом ненулевую амплитуду могут иметь не все указанные спектральные составляющие. Частотный спектр для напря-

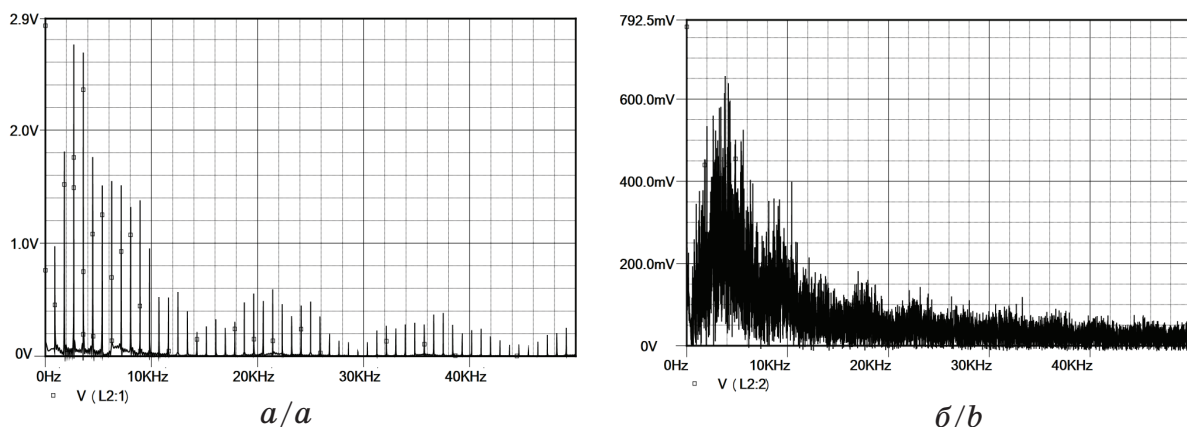


Рис. 8. Частотный спектр напряжения, действующего на входе LC-фильтра, при периодическом (а) и хаотическом (б) формировании ШИМ

Fig. 8. Voltage frequency spectrum of the LC-filter operating at the input at PWM periodic (a) and chaotic (b) formation

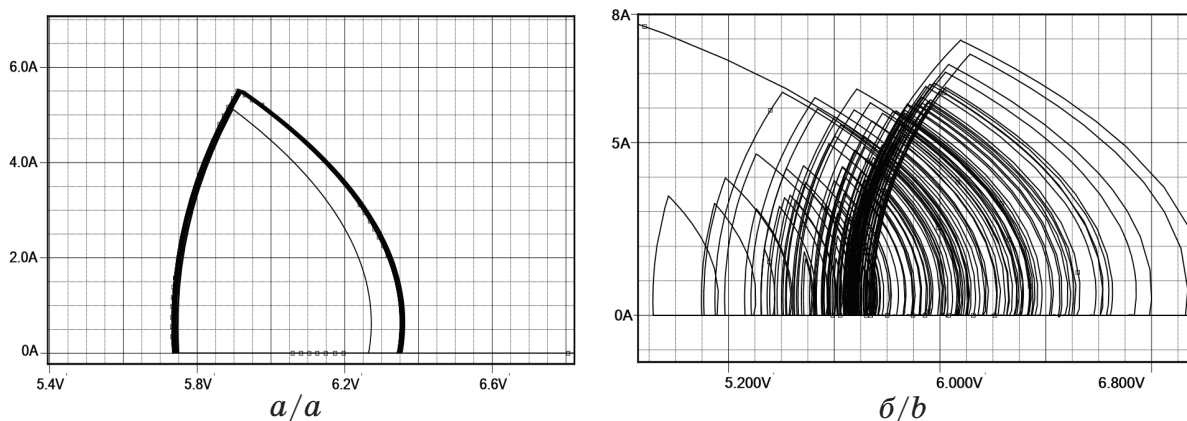


Рис. 9. Фазовые портреты входного тока и выходного напряжения при периодическом (а) и хаотическом (б) формировании ШИМ

Fig. 9. Phase portraits of the input current and output voltage under PWM periodic (a) and chaotic (b) formation

жения, показанного на (рис. 7, б), в отличие от периодического сигнала, будет широкополосным и непрерывным [20]. Спектральный анализ колебаний напряжения на входе LC-фильтра представлен на рис. 8.

Амплитуды гармоник (рис. 8) системы, работающей в хаотическом режиме, значительно ниже по сравнению с классической системой. Следовательно, хаотическая система будет иметь меньшую величину электромагнитной составляющей.

Основным и наиболее наглядным инструментом для исследования хаоса является графическое представление системы на фазовой плоскости. Изображения фазовых портретов для периодического и хаотического режима показаны на рис. 9.

В ходе работы было установлено, что эффективность преобразователя, работающего в режиме детерминированного хаоса, выше исследуемого классического.

Графические представления входной и выходной мощности, а также выходного напряжения для двух режимов работы представлены на рис. 10.

Также было проведено исследование эффективности при разных величинах нагрузки. Результаты занесены в таблицу.

Таблица. Результаты исследования входной и выходной мощности при разной величине нагрузки

Table. The results of studying the input and output power under different load

| $R_{н}, \text{ Ом}$ | Периодический режим Periodic mode | | | Хаотический режим Chaotic mode | | |
|---------------------|--------------------------------------|-----------------------|--------|-----------------------------------|-----------------------|--------|
| | $P_{вх}, \text{ Вт}$ | $P_{вых}, \text{ Вт}$ | КПД, % | $P_{вх}, \text{ Вт}$ | $P_{вых}, \text{ Вт}$ | КПД, % |
| 5 | 9,17 | 7,27 | 79,28 | 8,35 | 6,64 | 79,52 |
| 10 | 5,10 | 3,84 | 75,29 | 4,39 | 3,42 | 77,90 |
| 15 | 3,75 | 2,64 | 70,40 | 3,02 | 2,28 | 75,50 |
| 20 | 3,02 | 2,03 | 67,22 | 2,46 | 1,78 | 72,36 |
| 25 | 2,60 | 1,67 | 64,23 | 1,99 | 1,43 | 71,86 |

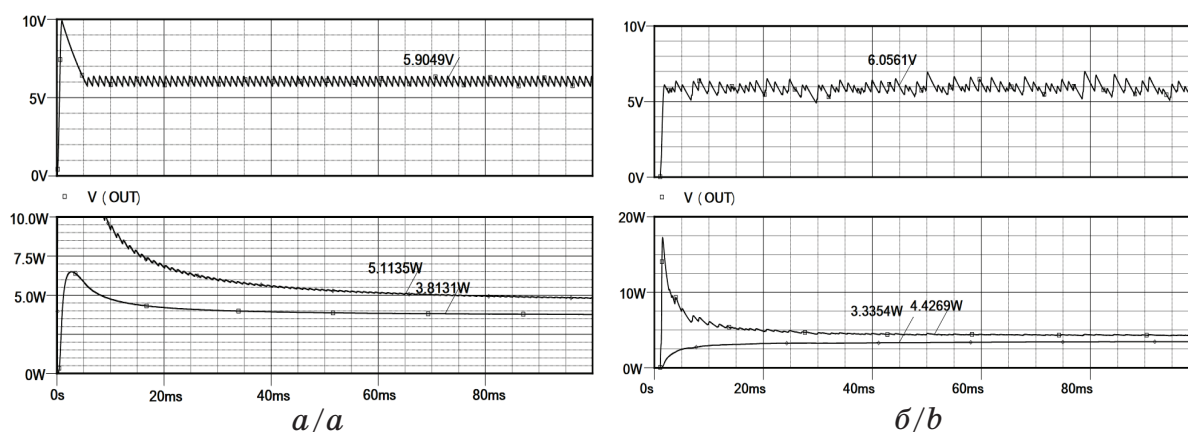


Рис. 10. Диаграммы выходных напряжений и входной и выходной мощности при периодическом (а) и хаотическом (б) формировании ШИМ

Fig. 10. Charts of output voltages and input and output power at PWM periodic (a) and chaotic (b) formation

Заключение

Разработанная и исследованная система управления, работающая в режиме детерминированного хаоса, дает возможность управления функциональной неустойчивостью и позволяет использовать детерминированный хаос в преобразовательной технике. Сравнивая диаграммы, показанные на рис. 6, отметим, что выходное напряжение V(OUT) при периодическом и хаотическом сигнале управления одинаково и находится на уровне 6 В.

Однако величина пульсаций у системы, работающей в хаосе, немного выше.

Таким образом, детерминированный хаос практически не влияет на характеристики преобразователя. Анализ спектров напряжения, действующих на входе LC-фильтра, показывает, что пики гармоник напряжения значительно ниже у системы, работающей в хаосе, хотя энергия в первом и во втором случае одинакова. Поэтому данная система может быть использована для снижения электромагнитных помех.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кальянов Э.В. Хаотические колебания в связанной системе бистабильных генераторов // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82. – № 3. – С. 1–6.
2. Прокопенко В.Г. Построение составного хаотического мультиаттрактора на основе асимметричных хаотических аттракторов // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – № 5. – С. 6–9.
3. Мезин Н.И., Глуценко А.А., Кузовлев Ю.Е. Генераторы хаоса на базе пленок железо-иттриевого граната для систем связи с хаотическим синхронным откликом // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38. – № 19. – С. 14–22.
4. Элияшев О.М. Безындуктивные генераторы хаотических колебаний по схеме Чуа // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2012. – № 2. – С. 12–15.
5. Бородин К.В. Определение области устойчивости проектного режима инвертирующего DC-DC-преобразователя напряжения // Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР». – Томск, 2013. – С. 129–131.
6. Исследование локальной устойчивости периодических режимов в нелинейных импульсных системах / О.А. Алейников, В.С. Баушев, А.В. Кобзев, Г.Я. Михальченко // Электричество. – 2013. – № 4. – С. 16–21.
7. Сухотерин Е.В., Николаенков Ю.К. Шумовые параметры и устойчивость низковольтных стабилизаторов напряжения // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2013. – № 32. – С. 40–44.
8. Chen Y., Zheng Y. Non linear behavior of a Z source DC/DC converter based on dual loop control // Journal of Vibroengineering. – 2015. – V. 17. – № 1. – P. 544–553.
9. Harb A.M., Harb S.M., Batarseh I.E. Bifurcation and chaos of DC-DC converter as applied to micro-inverter with multi control parameters // Renewable Energy Congress (IREC). – Orlando, 2015. – P. 1–6.
10. Hamza R. et al. Controller Design and Analysis for a Two-Cell Dc-Dc Converter in the Presence of Saturation // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2011. – V. 21. – № 01. – P. 341–361.
11. Скурятин Ю.В., Фомин А.И. Управление импульсным преобразователем на скользящих режимах в базисе энергий // Техническая электродинамика. – 2014. – № 4. – С. 87–89.
12. Комбинированный метод стабилизации выходного напряжения в многоуровневых инверторах / Н.П. Митяшин, Ю.Б. Томашевский, Е.Е. Миргородская, Р.А. Билюков, В.П. Глазков // Вестник СГТУ. – 2014. – № 4. – С. 77.
13. Межаков О.Г. Математическая модель понижающего преобразователя напряжения // Молодой ученый. – 2015. – № 5. – С. 171–176.
14. Федоров С.В., Бондарев А.В. Анализ влияния структуры системы управления матричными преобразователями частоты на основе широтно-импульсной модуляции на качество выходного напряжения // Новое слово в науке и практике: гипотезы и апробация результатов исследований. – 2014. – № 12. – С. 138–145.
15. Аржанухина Д.С., Кузнецов С.П. Система трех неавтономных осцилляторов с гиперболическим хаосом // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2012. – Т. 20. – № 6. – С. 56.
16. Квазипериодическая динамика системы управления с широтно-импульсной модуляцией / Ж.Т. Жусубалиев, А.И. Андриянов, А.А. Михалев, В.В. Шейн // Известия вузов. Сер. «Приборостроение». – 2013. – Т. 56. – № 6. – С. 75–81/.

17. Симонов А.В., Иванов Ю.М., Мелентьев В.С. Метод измерения интегральных характеристик на основе сравнения ортогональных составляющих гармонических сигналов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 2. – С. 59–62.
18. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Миронов А.А. Исследование метода измерения частоты гармонических сигналов // Ползуновский вестник. – 2013. – № 2. – С. 198–201.
19. Круглов В.П., Кузнецов А.С., Кузнецов С.П. Гиперболический хаос в системах с параметрическим возбуждением паттернов стоячих волн // Нелинейная динамика. – 2014. – Т. 10. – № 3. – С. 265–277.
20. Колесов В.В., Полубехин А.И., Чигин Е.П. Дискретные кодирующие алгоритмы на основе динамического хаоса для широкополосных информационных технологий // Вестник СибГУТИ. – 2015. – № 2. – С. 21.

Поступила 08.12.2015 г.

Информация об авторах

Федоров В.К., доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Омского государственного технического университета.

Федянин В.В., аспирант, ассистент кафедры электрической техники Омского государственного технического университета.

UDC 621.318

FEATURES OF THE DETERMINED CHAOS MODES OF DC VOLTAGE CONVERTERS FOR WIND AND SOLAR POWER STATIONS

Vladimir K. Fedorov¹,
k13201@rambler.ru

Viktor V. Fedyanin¹,
fedviktor2@gmail.com

¹ Omsk State Technical University,
11, Mira Avenue, Omsk, 644050, Russia.

Relevance of the research is defined by the necessity to increase the efficiency of converters for the needs of renewable energy. The strict and conflicting requirements are often imposed to the control algorithms of DC voltage converters used in solar and wind power. The theory of deterministic chaos may be one of the ways of solving the problem of improving the algorithms.

The aim of the research is to study and develop the control systems for DC-DC converters which allows working both in periodic mode and in deterministic chaos mode; to develop a physical model of DC-DC converter including the control system operating in deterministic chaos mode; make the voltage feedback circuit for stabilizing the output voltage at the given level.

Research method: a review of patent and literature on the topic. The mathematical and experimental methods of investigation of the DC-DC converters were used. The method of mathematical modeling is based on preparation of electrical systems equations solution. The method of experimental research is based on the study of the output graphs, taken from the physical model of the DC-DC converters.

Results. The authors have developed the physical model of the DC-DC converter with the control system operating in the deterministic chaos mode. The results show that the method of controlling the DC-DC converters with the help of deterministic chaos reduces electromagnetic interference, and improves significantly energy efficiency. The results obtained in the study can be used both at the stage of designing the power supplies in this class, and for further research and development of new control systems, including the control by deterministic chaos.

Key words:

Deterministic chaos, DC-DC converters, control system, bifurcation, dynamic chaos.

REFERENCES

- Kalyanov E.V. Chaotic oscillations in the coupled system of bi-stable oscillators. *Technical Physics*, 2012, vol. 82, no. 3, pp. 1–6. In Rus.
- Prokopenko V.G. Building a composite multi chaotic attractor based on asymmetric chaotic attractors. *Technical Physics*, 2013, vol. 83, no. 5, pp. 6–9. In Rus.
- Mezin N.I., Glushchenko A.A., Kuzovlev Yu.E. Chaos generators on the basis of yttrium-iron garnet films for communication with chaotic synchronous response. *Technical Physics Letters*, 2012, vol. 38, no. 19, pp. 14–22. In Rus.
- Eliyashiv O.M. Bezynduktivnye generatory khaoticheskikh kolebaniy po skheme Chua [Non-inductive generator of chaotic oscillations of Chua circuit]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2012, no. 2, pp. 12–15.
- Borodin K.V. Opredelenie oblasti ustoychivosti proektnogo rezhima invertiruyushchego DC-DC-preobrazovatelya napryazheniya [Determination of the region of stability of the project mode inverting DC/DC converter voltage]. *Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchennykh. Nauchnaya sessiya TUSUR* [All-Russian scientific conference of students, postgraduates and young researchers. Scientific session of TUSUR University]. Tomsk, 2013. pp. 129–131.
- Aleynikov O.A., Baushev V.S., Kobzev A.V., Mikhachenko G.Ya. Study of local stability of periodic regimes in nonlinear pulse systems. *Electricity*, 2013, no. 4, pp. 16–21. In Rus.
- Sukhoterina E.V., Nikolaenko Yu.K. Shumovye parametry i ustoychivost nizekvoltnykh stabilizatorov napryazheniya [Noise parameters and stability of low-voltage stress stabilizers]. *Elektrotehnicheskie kompleksty i sistemy upravleniya*, 2013, no. 32, pp. 40–44.
- Chen Y., Zheng Y. Non linear behavior of a Z source DC/DC converter based on dual loop control. *Journal of Vibroengineering*, 2015, vol. 17, no. 1, pp. 544–553.
- Harb A.M., Harb S.M., Batarseh I.E. Bifurcation and chaos of DC-DC converter as applied to micro-inverter with multi control parameters. *Renewable Energy Congress (IREC), 6th International IEEE*. Orlando, 2015. pp. 1–6.
- Hamza R. Controller Design and Analysis for a Two-Cell DC-DC converter in the Presence of Saturation. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2012, vol. 21, no. 1, pp. 341–361.
- Skuryatin Yu.V., Fomin A.I. Pulse converter control on the basis of sliding modes in energy. *Technical electro-dynamics*, 2014, no. 4, pp. 87–89. In Ukr.
- Mityashin N.P. Combined method of stabilizing the output voltage in multi-level inverters. *Bulletin of the Saratov State Technical University*, 2014, no. 4, p. 77. In Rus.
- Mezhakov O.G. Matematicheskaya model ponizhayushchego preobrazovatelya napryazheniya [Mathematical model of the buck voltage converter]. *Molodoy ucheny*, 2015, no. 5, pp. 171–176.
- Fedorov S.V., Bondarev A.V. Analiz vliyaniya struktury sistemy upravleniya matrichnymi preobrazovatelyami chastoty na osnove shirotno-impulsnoy modulyatsii na kachestvo vykhodnogo napryazheniya [Analysis of the influence of a control system structure of a matrix frequency converter based on pulse width modulation on the quality of the output voltage]. *Novoe slovo v nauke i praktike: gipotezy i aprobatsiya rezultatov*, 2014, no. 12, pp. 138–145.
- Arzhanukhina D.S., Kuznetsov S.P. System of three non-autonomous oscillators with hyperbolic chaos. *Izv. vuzov. Prikladnaya nelineynaya dinamika*, 2012, vol. 20, no. 6, p. 56. In Rus.

16. Zhusubaliev Zh.T., Andriyanov A.I., Mikhalev A.A., Shein V.V. Quasiperiodic dynamics of a control system with PWM. *Journal of Instrument Engineering*, 2013, vol. 56, no. 6, pp. 75–81. In Rus.
17. Simonov A.V., Ivanov Yu.M., Melentev V.S. The measuring technique for integral characteristics based on comparison of orthogonal components of harmonic signals. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol*, 2013, no. 2, pp. 59–62. In Rus.
18. Melentev V.S., Ivanov Yu.M., Mironov A.A. The research of measuring technique for harmonic signal frequency. *Polzunovsky Gazette*, 2013, no. 2, pp. 198–201. In Rus.
19. Kruglov V.P., Kuznetsov A.S., Kuznetsov S.P. Hyperbolic chaos in systems with parametric excitation of standing wave patterns. *Nelineynaya dinamika*, 2014, vol. 10, no. 3, pp. 265–277. In Rus.
20. Kolesov V.V., Polubekhin A.I., Chigin E.P. Digital coding algorithms based on dynamic chaos for broadband information technologies. *Vestnik SibGUTI*, 2015, no. 2, p. 21. In Rus.

Received: 8 December 2015.

Information about the authors

Vladimir K. Fedorov, Dr. Sc., professor, Omsk State Technical University.

Viktor V. Fedyanin, graduate student, assistant, Omsk State Technical University.

УДК 631.445.25 (550.42)

МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В ПОЧВАХ СОПРЯЖЕННОГО РЯДА ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ТОБОЛ-ИШИМСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ

Константинова Елизавета Юрьевна,
konstantliza@gmail.com

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

Актуальность. Изучение особенностей распределения и аккумуляции микроэлементов, в том числе тяжелых металлов, в почвах сельскохозяйственных ландшафтов является одним из наиболее актуальных направлений исследовательской работы в почвоведении, агрохимии и геоэкологии. Данные исследования характеризуются высокой значимостью для территории юга Тюменской области, которая отличается ярко выраженной сельскохозяйственной специализацией. Исследования особенностей и факторов распределения микроэлементов в почвах агроландшафтов могут быть востребованными для комплексной эколого-геохимической оценки территории, уточнения региональных фоновых концентраций элементов-поллютантов в почвах, при разработке мероприятий, направленных на снижение риска загрязнения различных компонентов природной среды и повышение качества сельскохозяйственной продукции.

Цель работы: исследование особенностей распределения ряда микроэлементов (Ti, Cr, Mn, Ni, Co Cu, Zn, Pb, Sr) в почвах сопряженного ряда лесостепной зоны Тобол-Ишимского междуречья на примере ключевого участка и выявление соответствия с гранулометрическим составом, содержанием гумуса, величиной pH.

Методы исследований: полевые почвенные и ландшафтно-геохимические исследования, определения pH водной почвенной суспензии потенциометрическим методом, гранулометрический анализ пиррофосфатным методом с использованием лазерного микроанализатора, определение валовых содержаний металлов рентгенфлуоресцентным анализом полного отражения (TXRF), определение содержания гумуса по методу Тюрина, статистическая обработка данных.

Результаты. Исследованы содержания и особенности распределения Ti, Cr, Mn, Ni, Co Cu, Zn, Pb, Sr в почвах сопряженного ряда лесостепной зоны центральной части Тобол-Ишимского междуречья. Полученные данные могут свидетельствовать о том, что почвы рассматриваемого участка центральной части Тобол-Ишимского междуречья обогащены Co, Cu, Pb и обеднены Ni, Zn, Sr, Mn по сравнению со средним содержанием в почвах и почвообразующих породах юга Западной Сибири. Выявлено, что почвы участка, несмотря на положение в рельефе, слабоконтрастны по гранулометрическому составу; данный параметр практически не влияет на распределение микроэлементов.

Ключевые слова:

Микроэлементы, тяжелые металлы, лесостепь, агроландшафт, Тюменская область, Западная Сибирь, Тобол-Ишимское междуречье.

Введение

Значительное увеличение концентраций тяжелых металлов и металлоидов в почвах агроландшафтов, обусловленное их интенсивным поступлением с атмосферными выбросами промышленных предприятий и выхлопными газами автомобильного транспорта, внесением органических и минеральных удобрений, значительно увеличивает риск ухудшения эколого-геохимической обстановки в районах с развитым сельским хозяйством. Избыточное содержание элементов-поллютантов, способных перемещаться по трофическим цепочкам в почвах агроландшафтов, оказывает негативное воздействие на качество сельскохозяйственной продукции и представляет существенную опасность для здоровья животных и человека [1].

В пределах основных сельскохозяйственных районов Западной Сибири располагаются главным образом лесостепные и степные ландшафты. Данные ландшафты подверглись наибольшей трансформации в процессе интенсивного развития сельского хозяйства региона, наблюдавшегося в 50–70-е гг. XX в. [2]. Значительное изменение характера землепользования, активное использование средств химизации и механизации привели к

повышению опасности эрозионных процессов, снижению продуктивности биоценозов, накоплению химических элементов-поллютантов в почвах.

Исследованиям особенностей поведения микроэлементов, в том числе тяжелых металлов и металлоидов, в почвах и ландшафтах основных геоморфологических районов лесостепной и степной зон Западной Сибири посвящено значительное количество работ. Фундаментальные исследования в области агрохимии, почвоведения и геохимии были выполнены для территорий Присалаирской равнины [3–6] Приобского плато [1, 4, 5], Кулундинской равнины [1, 3–6] Барабинской низменности [1, 4–6] и Омского Прииртышья [5, 7–9].

В то же время следует отметить, что геохимические особенности почв и ландшафтов западной части лесостепной зоны Западной Сибири (Тобол-Ишимского междуречья) исследованы в меньшей степени. В отдельных работах по содержанию химических элементов в почвах лесостепной зоны юга Тюменской области [10–12] не рассматриваются особенности профильного распределения микроэлементов, связь микроэлементного состава почв с особенностями почвообразования.

В данной работе приводятся результаты исследования особенностей распределения Ti, Cr, Mn, Ni, Co Cu, Zn, Pb, Sr в почвах сопряженного ряда участка, типичного для территории лесостепной зоны, в пределах центральной части Тобол-Ишимского междуречья.

Объекты и методы исследований

Полевые работы проводились на участке, расположенном в 3 км восточнее деревни Окуневка (Омутинский район Тюменской области), в 2,5 км к северу от трассы Тюмень-Ишим. Ключевой участок представляет собой участок поля (залежи), пересекаемый неглубокой вытянутой с северо-запада на юго-восток западиной и окруженный со всех сторон березовыми и осиново-березовыми колками. Ширина участка – 600 м, протяженность с север на юг – 800 м, перепад высот в пределах участка – около 3 м.

Выбор участка обусловлен следующими причинами: во-первых, участок находится на достаточном удалении от городов и объектов инфраструктуры; во-вторых, характеризует типичный для лесостепной зоны Тобол-Ишимского междуречья комплекс колок-поле.

Участок исследований располагается в пределах субгоризонтальной структурно-денудационной (эрозионной) плоской и слабоволнистой Ишимской равнины (абс. высоты 120–155 м) с неглубоким расчленением [13, 14]. Покровные отложения представлены характерными для юга Западной Сибири лессовидными суглинками мощностью 3–8 м [10, 14]. По гранулометрическому составу преобладают средние и тяжелые суглинки; глины и легкие суглинки встречаются значительно реже. Покровные отложения локальных депрессий характеризуются более тяжелым гранулометрическим составом и иногда признаками слабого засоления [14, 15].

В соответствии с физико-географическим районированием юга Тюменской области [16] рассматриваемая территория относится к Ишим-Тобольской провинции подзоны северной лесостепи. Для района исследований характерно чередование степных участков с березовыми лесами по западинам и плоским плакорам. Луговые степи и остепненные луга с темно-серыми лесными почвами и черноземами выщелоченными и оподзоленными занимают повышенные элементы рельефа. Березовые травянистые леса на темно-серых лесных почвах и солодах приурочены к междуречьям, лощинам и западинам на гривах; по ложбинам стока распространены минератрофные болота и цепочки мелких озер [14].

Территория Омутинского района является зоной интенсивного сельскохозяйственного освоения: площадь сельскохозяйственных угодий составляет 94,2 тыс. га, из них пашня занимает 45 тыс. га [17]. Наибольший удельный вес в структуре сельскохозяйственных угодий занимают паш-

ни – 46,5 тыс. га (50,3 %), сенокосы – 21 тыс. га (22,6 %), пастбища – 14,6 тыс. га (15,7 %), залежи – 10,1 тыс. га (11 %), многолетние насаждения – 232 га (0,4 %) [18].

В пределах ключевого участка было заложено 13 почвенных разрезов и отобрано 5 поверхностных почвенных проб, характеризующих основные ландшафтные позиции: участки пашни и колковых лесов на плакорах, склоны западины различной крутизны и степени эродированности, нижнюю часть западины. Для всех разрезов были выполнены почвенные описания и произведен отбор проб по генетическим горизонтам (всего 80 образцов). Описания почв участка даны в соответствии с «Классификацией и диагностикой почв России» (2004) [19].

Перед выполнением химико-аналитических работ была проведена предварительная пробоподготовка почвенных образцов по общепринятой методике [20]. Все химико-аналитические работы выполнены автором в Эколого-геохимическом научно-образовательном центре географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Химико-аналитические работы включали следующие виды определений (во всех 80 образцах): рН водной почвенной суспензии потенциометрическим методом, органического углерода методом Тюрина [20], гранулометрического состава лазерным анализатором Fritsch «Analysette 22 Economy» [21]. В 80 пробах были определены валовые содержания следующих химических элементов: Ti, Cr, Mn, Ni, Co Cu, Zn, Pb, Sr, Fe.

Определение валового содержания микроэлементов выполнено рентгенфлуоресцентным спектрометром Rontec PicoTAX, работающим по схеме полного отражения. Пробоподготовка и определение микроэлементов производились по следующей схеме [22]: в полипропиленовые конические пробирки EPPENDORF объемом 1,5 мл помещали навески подготовленной почвы в 0,02–0,03 г, 1,25 мл раствора Triton x-100 (10 %) и 0,01 мл Se стандарта (раствор 1 г/л). Затем пробирки встряхивались в течение 20 с в центрифуге. После этого пипеткой 0,01 мл помещали полученный раствор в центр круглого стекла. Круглое стекло было предварительно промыто деионизированной водой и высушено. Далее проба на стекле помещалась в нагретый до 800 °С сушильный шкаф до полного высыхания раствора. Высушенную пробу помещали в приемную кювету спектрометра. Последующие манипуляции проводились с помощью специального программного обеспечения.

Рентгенфлуоресцентный метод полного отражения (TXRF) для определения элементного состава почв характеризуется достаточно высокой точностью при правильной калибровке прибора [23]. По сравнению с более распространенным методом определения валового содержания микроэлементов – масс-спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) – наибольшая точность

определения характерна для Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, в то же время содержания Sr и Pb могут быть несколько завышенными [23, 24].

Для интерпретации и анализа данных проводилась их статистическая обработка с использованием пакета STATISTICA и визуализация. В первую очередь была проведена проверка выборки из данных, полученных по результатам измерений (общих свойств почв и содержания микроэлементов), на нормальность распределения с использованием критерия Колмогорова-Смирнова. Вычислены статистические характеристики распределения исследуемых микроэлементов как для исследуемого участка в целом, так и для отдельных типов почв, встречающихся в пределах участка: среднее, минимальное и максимальное значение, стандартное отклонение, стандартная ошибка среднего, коэффициент вариации.

Были выделены корреляционные связи между определяемыми элементами и некоторыми свойствами почв (содержание илстой фракции, рН, гумус). Элементы со схожим распределением объединялись в ассоциации.

Для определения парагенетических ассоциаций микроэлементов был проведен кластерный анализ методом объединения.

Результаты и их обсуждение

Почвы автономных позиций (участки березовых колков и пашни на плакорах) представлены преимущественно темно-серыми лесными почвами (табл. 1, разр. 1) и агротемно-серыми глубокопахотными почвами (табл. 1, разр. 5). Для почв, формирующихся в автономных ландшафтных позициях, характерна дифференциация профиля по гранулометрическому составу: наблюдается некоторое обеднение илстой фракцией нижней части темного гумусового горизонта PU и наличие выраженного субэлювиального горизонта BEL. Также важным признаком элювиально-иллювиальной дифференциации почвенного профиля является типичное для серых лесных почв «седение» оподзоленного горизонта [25]. Значения рН в пределах профиля меняются слабоконтрастно (от 6 в гумусовых горизонтах до 8 в нижней части профиля), что обусловлено довольно глубоким залеганием карбонатов и их интенсивным выщелачиванием из профиля. Темно-серые почвы, формирующиеся под березовым колком, по сравнению с почвами под пашней характеризуются большей глубиной вскипания карбонатов и большей выщелоченностью. Для них характерна значительная мощность гумусового горизонта (около 30 см) с равномерным содержанием гумуса (5–6 %).

Агротемно-серые почвы склонов различной крутизны (или агрочерноземы глинисто-иллювиальные средне- и тяжелосуглинистые) различаются в первую очередь по степени эродированности: по мощности гумусового горизонта и содержанию органического вещества. Агротемно-серые почвы

верхних более пологих частей склонов (табл. 1, разр. 16) слабо эродированы: для них характерен ярко выраженный аккумулятивный тип распределения гумуса по профилю, даже несмотря на распашку. В некоторых разрезах наблюдается незначительное повышение содержания гумуса с глубиной (табл. 1, разр. 7), что может свидетельствовать о признаках наличия морфологически невыраженного второго гумусового горизонта, характерного для почв Омутинского района [10]. В целом почвы пологих склонов близки по своим свойствам к почвам автономных позиций.

Агротемно-серые почвы нижних более крутых частей склонов (табл. 1, разр. 13) западины характеризуются более высокой степенью эродированности: наименьшей среди всех почв участка мощностью гумусового профиля, глубокой распашкой (с вовлечением текстурного горизонта), обедненностью гумусом (около 4 %), по сравнению с почвами автономных позиций. Наблюдается заметная тенденция к уменьшению глубины вскипания карбонатов (54 см) по сравнению с почвами автономных позиций (80 см). В почвах практически не выражена элювиально-иллювиальная дифференциация профиля.

Почвы днища западины на пашне представлены агросолодями гумусово-стратифицированными глубокопахотными (табл. 1, разр. 7), а почвы днища западины под кустарниками и лесной растительностью – солодами гумусово-стратифицированными (табл. 1, разр. 8) и темного гумусовыми (табл. 1, разр. 18) соответственно. Данные почвы среди всех почв сопряженного ряда характеризуются наибольшей степенью гидроморфизма, связанного с сезонным переувлажнением и проявляющегося в виде оруденения в текстурных горизонтах. Привнос материала из поверхностных горизонтов вышележащих по профилю почв приводит к формированию мощного (30–40 см) стратифицированного темного гумусового горизонта (RY) с высоким содержанием гумуса (до 7 %).

Статистическая обработка результатов определения общих свойств почв показала, что величины рН соответствуют нормальному распределению. Распределение остальных свойств почв и содержания рассматриваемых микроэлементов отличается от нормального.

Полученные данные о содержании микроэлементов в почвах участка в целом приведены в табл. 2.

Выбранный способ определения (TXRF) наиболее точен в отношении следующих микроэлементов: Ti, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, поэтому высокая вариативность полученных значений связана не с ошибкой определения, а с неоднородностью выборки. Так, значительный разброс абсолютных значений характерен для таких элементов, как Ti, Mn, Cu и Zn (табл. 2), что, вероятно, связано со значительным количеством образцов выборки, отобранных из органических и органо-минеральных почвен-

Таблица 1. Общие свойства изученных почв участка

Table 1. General properties of the studied soils

| Почва Soil | Положение разреза Location | Горизонт Soil layer | Глубина отбора, см Average sampling depth, cm | pH | Гумус, % Humus, % | Содержание фракций, %; размер, мм Content of fractions, %; size, mm | | | | | |
|---|--|------------------------|--|-----|----------------------|--|-------------|------------|-----------|-----------|--------|
| | | | | | | <0,001 | 0,001–0,005 | 0,005–0,01 | 0,01–0,05 | 0,05–0,25 | 0,25–1 |
| Темно-серая, разр. 1 Dark gray soil, p. 1 | Березовый колок на плакоре Birch outlier on a flatland | AU _e | 15 | 6,1 | 6,2 | 5,72 | 23,85 | 11,28 | 56,56 | 2,59 | 0,00 |
| | | AU _e | 25 | 6,2 | 4,9 | 6,06 | 26,40 | 8,43 | 50,84 | 2,33 | 5,94 |
| | | BEL | 35 | 6,2 | 1,8 | 8,03 | 29,64 | 14,86 | 44,50 | 2,95 | 0,02 |
| | | BT | 55 | 6,2 | 1,0 | 7,77 | 26,19 | 16,14 | 45,91 | 0,90 | 3,09 |
| | | BT | 85 | 6,7 | 0,8 | 8,39 | 28,07 | 13,31 | 43,15 | 6,97 | 0,11 |
| | | BC _{ca} | 100 | 8,0 | 0,8 | 13,35 | 36,12 | 10,50 | 39,16 | 0,86 | 0,01 |
| Агротемно-серая глубокопахотная, разр. 5 Postagrogenic dark gray soil, p. 5 | Участок пашни на плакоре Tilled area on a flatland | PU | 13 | 6,6 | 4,2 | 9,52 | 35,54 | 3,19 | 51,54 | 0,20 | 0,01 |
| | | BT _{yu} | 35 | 6,6 | 1,1 | 8,58 | 30,37 | 17,32 | 43,35 | 0,38 | 0,00 |
| | | BT _{yu} | 65 | 6,5 | 1,2 | 9,21 | 30,20 | 8,67 | 50,68 | 1,24 | 0,00 |
| | | BT _{yu} | 100 | 7,5 | 0,9 | 12,02 | 32,41 | 13,27 | 41,77 | 0,52 | 0,01 |
| | | BC _{ca} | 114 | 8,0 | 0,8 | 17,27 | 42,60 | 7,63 | 32,29 | 0,21 | 0,00 |
| Агротемно-серая глубокопахотная, разр. 16 Postagrogenic dark gray soil, p. 16 | Верхняя более пологая часть склона западины Upper smooth part of the depres- sion slope | PU | 13 | 7,2 | 6,0 | 7,82 | 31,48 | 15,50 | 43,18 | 2,02 | 0,00 |
| | | PU | 30 | 7,2 | 5,2 | 9,28 | 33,23 | 14,70 | 42,00 | 0,79 | 0,00 |
| | | BT | 47 | 7,5 | 1,4 | 8,07 | 27,39 | 16,17 | 46,37 | 2,00 | 0,00 |
| | | BT | 85 | 7,8 | 0,9 | 9,57 | 29,55 | 16,14 | 40,94 | 3,79 | 0,01 |
| | | BC _{ca} | 95 | 8,0 | 1,0 | 12,24 | 32,25 | 13,28 | 40,87 | 1,34 | 0,02 |
| Агротемно-серая, разр. 13 Postagrogenic dark gray soil, p. 13 | Нижняя более крутая часть скло- на западины Lower steep part of the depression slope | PU _{rh,e} | 13 | 6,8 | 6,4 | 7,98 | 31,65 | 15,95 | 41,83 | 2,59 | 0,00 |
| | | PU _{rh,e} | 30 | 6,8 | 5,6 | 7,55 | 28,61 | 18,00 | 43,44 | 2,40 | 0,00 |
| | | BEL | 42 | 6,6 | 1,7 | 9,12 | 27,65 | 15,63 | 42,78 | 4,82 | 0,00 |
| | | BT | 65 | 6,8 | 1,2 | 7,78 | 24,14 | 16,10 | 47,34 | 4,64 | 0,00 |
| | | BT | 85 | 7,6 | 1,0 | 8,23 | 23,30 | 14,53 | 44,89 | 3,29 | 5,76 |
| | | BC _{ca} | 100 | 7,9 | 0,9 | 7,72 | 20,11 | 10,85 | 31,44 | 2,73 | 27,15 |
| Агросолодь, разр. 7 Postagrogenic dark deep water accu- mulative solod, p. 7 | Днище западины на пашне Tilled area on depression bottom | PU _{rh} | 12 | 6,3 | 3,3 | 6,17 | 27,01 | 16,80 | 44,53 | 5,44 | 0,05 |
| | | AU' | 31 | 6,1 | 5,9 | 6,59 | 26,52 | 16,69 | 47,39 | 2,81 | 0,00 |
| | | AU'' | 50 | 6,3 | 7,9 | 4,42 | 21,01 | 16,90 | 55,70 | 1,97 | 0,00 |
| | | AEL | 63 | 7,0 | 0,7 | 4,79 | 19,01 | 16,79 | 53,32 | 6,09 | 0,00 |
| | | EL | 73 | 7,0 | 0,8 | 5,42 | 21,76 | 18,25 | 50,66 | 3,91 | 0,00 |
| | | BTG _{ox} | 90 | 6,9 | 0,8 | 9,57 | 28,58 | 15,50 | 44,41 | 1,92 | 0,02 |
| | | BTG _{ox} | 129 | 7,1 | 0,7 | 4,60 | 12,65 | 7,97 | 23,82 | 3,56 | 47,40 |
| | | RY | 5 | 6,5 | 7,0 | 8,26 | 30,36 | 16,61 | 40,99 | 3,76 | 0,02 |
| Солодь гумусово-стратифициро- ванная, разр. 8 Dark deep water accumulative solod, p. 8 | Ивняк в днище западины Willow in local depression | AY | 15 | 6,0 | 5,8 | 12,04 | 29,64 | 3,68 | 52,85 | 1,79 | 0,00 |
| | | AEL | 27 | 6,1 | 3,0 | 5,99 | 28,40 | 5,96 | 56,62 | 2,99 | 0,04 |
| | | EL | 33 | 6,5 | 0,8 | 5,19 | 21,22 | 6,09 | 50,01 | 17,48 | 0,01 |
| | | BT | 43 | 6,5 | 1,0 | 8,76 | 29,00 | 16,38 | 44,62 | 1,24 | 0,00 |
| | | BT | 60 | 6,5 | 0,9 | 10,89 | 33,25 | 14,61 | 40,49 | 0,75 | 0,01 |
| | | AEL | 9 | 5,4 | 6,6 | 3,52 | 14,99 | 11,90 | 37,65 | 5,54 | 26,40 |
| Солодь темногумусовая, разр. 18 Solod, p. 18 | Осиновый колок в понижении Aspen outlier in a hollow | EL _{fn} | 20 | 5,5 | 0,6 | 4,18 | 17,23 | 15,70 | 56,98 | 5,91 | 0,00 |
| | | BEL | 33 | 6,1 | 0,6 | 5,87 | 18,51 | 12,63 | 46,33 | 11,88 | 4,78 |
| | | BTG _{ox} | 55 | 6,1 | 0,8 | 16,79 | 38,87 | 11,51 | 31,64 | 1,19 | 0,00 |
| | | BTG _{ox} | 85 | 6,1 | 0,9 | 9,25 | 25,42 | 15,89 | 48,61 | 0,83 | 0,00 |

ных горизонтов и существенно отличающихся по содержанию данных элементов от субстрата. Значения коэффициента вариации, как меры относительного варьирования, также подтверждают вывод о неоднородности распределения наблюдаемых содержаний рассматриваемых микроэлементов.

Полученные данные могут свидетельствовать о том, что почвы Тобол-Ишимского междуречья обогащены Cu, Pb и обеднены Mn Ni, Zn, Sr по сравнению со средним содержанием в почвах и почвооб-

разующих породах юга Западной Сибири. Более низкое содержание Sr в исследованных почвах может быть объяснено тем, что северный ареал лесостепи Тобол-Ишимского междуречья по условиям миграции и аккумуляции микроэлементов ближе к слабокислым лесным ландшафтам, нежели к аридным степным (Барабинская низменность), что проявляется особенно ярко для Cu.

Высокие наблюдаемые содержания Co (табл. 3) в почвах участка являются отличительной чертой

Таблица 2. Основные статистические показатели изученных микроэлементов, включая все горизонты почв участка

Table 2. Basic statistics of the studied micronutrients including all layers of the soils

| Показатель/Criteria | Ti* | Cr | Mn* | Co | Ni | Cu | Zn | Sr | Pb |
|--|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Количество образцов, шт./Sample, pcs | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| Среднее/Mean | 158,94 | 65,56 | 28,85 | 49,63 | 27,71 | 57,53 | 50,21 | 53,20 | 21,80 |
| Минимум/Minimum | 14,90 | 11,00 | 3,30 | 8,00 | 6,00 | 6,00 | 9,00 | 12,00 | 5,00 |
| Максимум/Maximum | 1034,20 | 289,00 | 164,20 | 132,00 | 160,00 | 843,00 | 243,00 | 328,00 | 75,00 |
| Стандартное отклонение/Standard Deviation | 169,21 | 52,10 | 31,77 | 29,62 | 22,32 | 111,69 | 47,18 | 43,61 | 15,17 |
| Стандартная ошибка среднего/Standard Error | 18,92 | 5,83 | 3,55 | 3,31 | 2,50 | 12,49 | 5,28 | 4,88 | 1,70 |
| Коэффициент вариации, %/CV, % | 106,46 | 79,47 | 110,15 | 59,69 | 80,54 | 194,16 | 93,96 | 81,98 | 69,57 |

Примечание. Содержания Mn и Ti приведены в мг/100 г почвы.

Note. Contents of Mn and Ti are in mg/100 g soil.

Приишимья и тяготеющих к нему регионов. Причины повышенного содержания данного элемента в почвах и почвообразующих породах этой территории до конца неизвестны [6].

Средние содержания Cr (табл. 3) в почвах территории исследований полностью соответствуют фоновым значениям для юга Западной Сибири.

Таблица 3. Содержание микроэлементов в почвах Tobol-Iшимского междуречья (в мг/кг)

Table 3. Content of trace elements in soils of Tobol-Ishim interfluvium (in mg/kg)

| Элемент Element | Изученные почвы в целом (n=80) Studied soils as the whole (n=80) | Темно-серые почвы (n=7) Dark grey soils (n=7) | Агропеллоиды (n=43) Posttagrogenic dark grey soils (n=43) | Агросолоди (n=18) Posttagrogenic dark deep water accumulative solods (n=18) | Солоди (n=12) Solods (n=12) | Почвообразующие породы [6] Soil-forming rocks [6] | Геохимический фон [1] Geochemical background [1] | Почвы Тюменской области [10] Soils of Tyumen region [10] |
|--------------------|---|--|--|--|--------------------------------|--|---|---|
| Ti* | 158,94 | 142,34 | 159,17 | 105,01 | 248,73 | 390 | 410 | - |
| Cr | 65,56 | 44,43 | 73,49 | 51,78 | 70,17 | 63 | 61 | - |
| Mn* | 28,84 | 48,27 | 30,93 | 17,59 | 26,91 | 77 | 83 | - |
| Co | 49,63 | 52,14 | 50,56 | 33,50 | 69,00 | 11 | 11 | 17-29 |
| Ni | 27,71 | 62,57 | 24,53 | 24,56 | 23,50 | 41,4 | 40 | 56 |
| Cu | 57,52 | 117,00 | 44,56 | 33,39 | 105,50 | 44,2 | 43 | 53 |
| Zn | 50,21 | 60,29 | 46,88 | 63,83 | 35,83 | 82,4 | 92 | 40 |
| Sr | 53,20 | 44,43 | 54,70 | 43,06 | 68,17 | 548 | 595 | - |
| Pb | 21,80 | 29,71 | 21,53 | 18,67 | 22,83 | 17,9 | 18 | 14 |

Примечание. Концентрация Mn и Ti приведена в мг/100 г почвы.

Note. Concentration of Mn and Ti is in mg/100 g soil.

Полученные в ходе исследований данные свидетельствуют о том, что почвы сопряженного ряда в пределах рассматриваемого участка (табл. 3) значительно отличаются по их валовым содержаниям

(рис. 1) и условиям распределения микроэлементов по профилю.

Наиболее высокие концентрации Pb, Zn, Cu, Ni и Mn отмечены для темно-серых почв автономных позиций (рис. 1, а). Данный факт объясняется тем, что для почв плакоров характерны малая эродированность, значительный запас органического вещества и, соответственно, наличие контрастного биогеохимического барьера в поверхностных горизонтах. Биохимический барьер препятствует выносу этих микроэлементов из ландшафта за счет образования соединений с малоподвижными гуминовыми кислотами. Кроме того, следует отметить, что в лесостепных ландшафтах миграция Pb затруднена вследствие образования слаборастворимых карбонатов, препятствующих выносу Pb из почв автономных позиций [26].

Агротемно-серые почвы, формирующиеся на склонах западины (рис. 1, б), обеднены микроэлементами, отличающимися интенсивной биогенной аккумуляцией (Cu и Zn). Содержание остальных микроэлементов в них практически не отличается от содержания в почвах плакоров.

Солоди и агросолоди, формирующиеся в днище западин, отличаются повышенными содержаниями Cr, Sr, Pb и Cu. В лесостепных ландшафтах со значениями кислотности среды близкими к нейтральным Cu и другие элементы, характеризующиеся интенсивной биогенной аккумуляцией, малоподвижны, что определяет более высокие содержания Cu как в темно-серых почвах автономных ландшафтов, так и в почвах понижений с повышенным гидроморфизмом (солодях, агросолодях). Особенно высоким сорбционным сродством с Cu обладает двуокись Mn, с чем связано накопление Cu в марганцевых конкрециях, пленках, дендригах. Медь аккумулируется в подчиненных ландшафтах в пределах окисленных горизонтов на железисто-марганцевых конкрециях, в автономных позициях в условиях близкого залегания карбонатов [27].

При изучении особенностей распределения микроэлементов в почвах участка были установлены взаимосвязи между содержанием микроэлементов

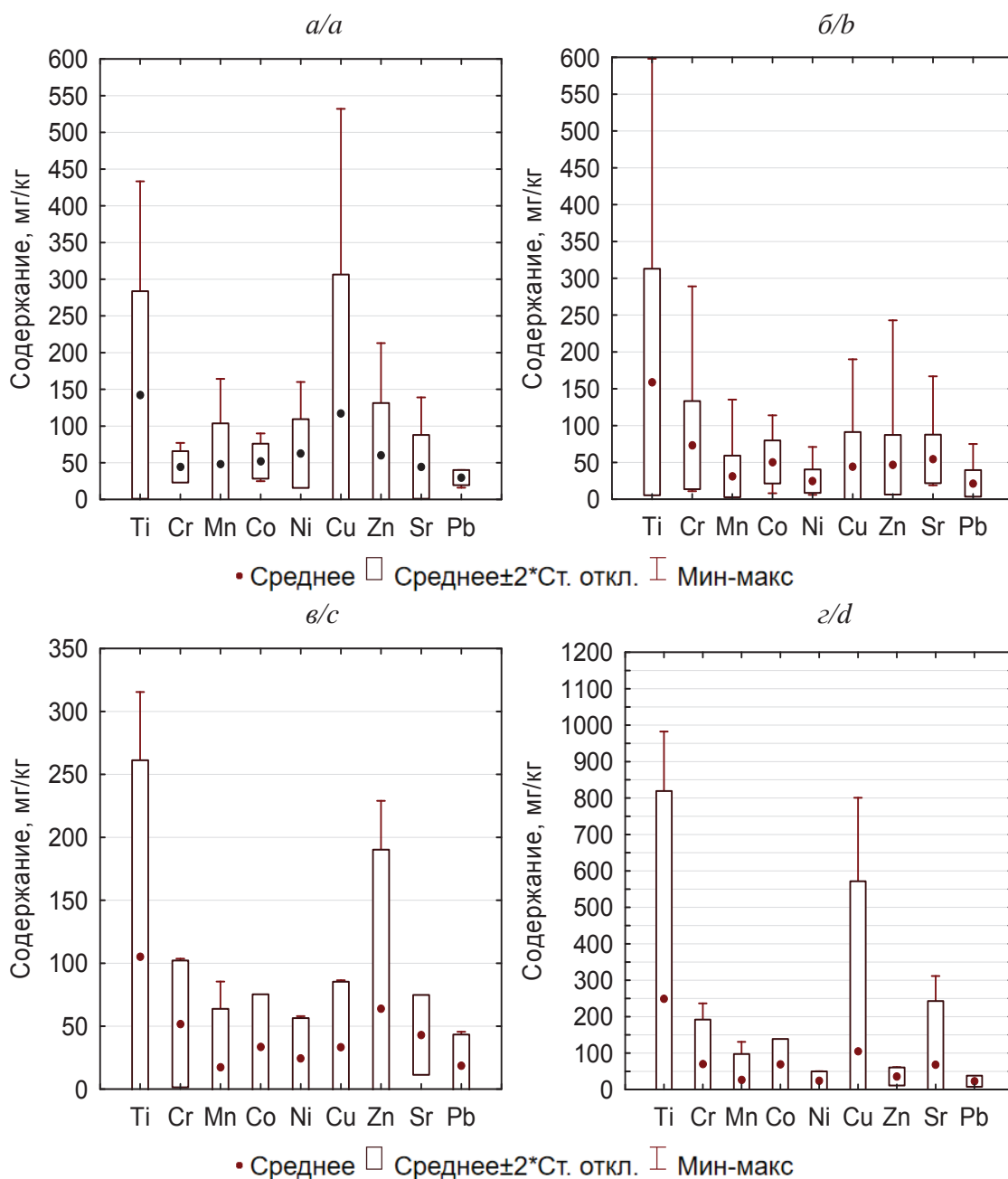


Рис. 1. Средние показатели содержания микроэлементов в почвах: а – темно-серых; б – агротемно-серых; в – агросолодах; г – солодах гумусово-стратифицированных. Концентрация Mn и Ti приведена в мг/100 г почвы

Fig. 1. Average values of trace elements in soils: а – dark gray soils; б – postagrogenic dark gray soils; в – postagrogenic dark deep water accumulative solod; г – solod. The concentrations of Mn and Ti are given in mg/100 g soil

и основных свойств почв с использованием непараметрического коэффициента Спирмена. Установлена положительная значимая степень корреляции между содержанием всех рассматриваемых элементов и содержанием Fe в почвах участка исследования (табл. 4). При этом для Ti, Cr, Mn, Sr наблюдается значимая положительная корреляция с содержанием Fe; для Co, Cu, Zn и Pb наблюдается существенная или относительно слабая корреляция.

Корреляция между содержанием микроэлементов и органическим веществом в пределах рассматриваемого участка выражена достаточно слабо. Слабая положительная корреляция наблюдается между содержанием гумуса и Cu (табл. 4).

Следует отметить, что корреляционная связь содержания микроэлементов с гранулометрическим составом для почв не является очевидной, поскольку в целом почвы участка по данному показателю слабоконтрастны. Интересным представляется

Таблица 4. Коэффициенты корреляции Спирмена между содержанием микроэлементов и отдельными почвенными свойствами ($n=80$)

Table 4. Spearman Rank Order Correlations between the content of trace elements and selected soil properties ($n=80$)

| Переменные Variable | Гумус Humus | Пыль средняя (0,005–0,01 мм) Medium silt (0,005–0,01 mm) | Пыль крупная (0,01–0,05 мм) Sandy silt (0,01–0,05 mm) | Песок мелкий (0,05–0,25 мм) Fine sand (0,05–0,25 mm) | Песок средний и крупный (0,25–1,0 мм) Coarse and medium sand (0,25–1,0 mm) | Fe | Ti | Cr | Mn | Co | Ni | Cu | Zn | Sr | Pb |
|------------------------|----------------|---|--|---|---|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Ti | -0,23* | -0,06 | 0,17 | 0,08 | 0,08 | 0,85** | 1,00 | 0,58** | 0,67** | 0,47** | 0,18 | 0,40** | 0,56** | 0,57** | 0,54** |
| Cr | -0,01 | 0,02 | -0,03 | 0,06 | -0,08 | 0,59** | | 1,00 | 0,58** | 0,18 | 0,31** | 0,45** | 0,44** | 0,48** | 0,40** |
| Mn | 0,13 | -0,14 | 0,11 | 0,02 | 0,11 | 0,80** | | | 1,00 | 0,36** | 0,25* | 0,38** | 0,44** | 0,61** | 0,46** |
| Co | -0,01 | -0,16 | 0,23* | -0,11 | 0,03 | 0,36** | | | | 1,00 | 0,24* | 0,51** | 0,43** | 0,25* | 0,58** |
| Ni | -0,08 | -0,21 | 0,02 | -0,01 | -0,15 | 0,14 | | | | | 1,00 | 0,21 | 0,17 | 0,11 | 0,35** |
| Cu | 0,23* | -0,05 | 0,18 | 0,10 | -0,16 | 0,26* | | | | | | 1,00 | 0,61** | 0,31** | 0,44** |
| Zn | 0,15 | -0,09 | 0,20 | 0,30** | -0,03 | 0,40** | | | | | | | 1,00 | 0,52** | 0,56** |
| Sr | 0,07 | -0,20 | 0,12 | 0,11 | 0,19 | 0,53** | | | | | | | | 1,00 | 0,41** |
| Pb | 0,03 | -0,32** | 0,08 | -0,02 | 0,23* | 0,44** | | | | | | | | | 1,00 |

Примечание/Note. * $p < 0,05$ ** $p < 0,01$.

ся наличие относительно слабой отрицательной корреляции между содержанием средней и мелкой пыли и содержанием Pb, а также наличие относительно слабой положительной корреляции между содержанием мелкого песка и Zn (табл. 4).

Значимая положительная корреляция выявлена между содержаниями Cr и Ti, Cr и Mn, Mn и Ti, Sr и Ti, Sr и Pb, Mn и Sr, Cu и Co, Co и Pb, Zn и Cu, Zn и Sr, Zn и Pb (табл. 4). Анализ дендрограммы корреляционной матрицы изученных микроэлементов показывает значимые корреляционные связи (рис. 2) Ti-Sr-Cr-Mn (критический уровень $1-r=0,39$).

Выводы

Полученные данные позволяют предположить, что почвы сопряженного ряда центральной части

Тобол-Ишимского междуречья незначительно обогащены Cu, Pb, Co и обеднены Mn Ni, Zn, Sr по сравнению со средним содержанием в почвах и почвообразующих породах юга Западной Сибири. Данные особенности могут быть обусловлены региональными особенностями почвообразующих пород – лессовидных суглинков, распространенных на территории исследований.

Почвы автономных и подчиненных ландшафтов северной лесостепи Тобол-Ишимского междуречья слабо контрастны по сравнению с лесостепью Омского Приишмья и Барабинской низменности.

Почвы северной лесостепи в пределах Тюменской области характеризуются достаточно высокой степенью устойчивости по отношению к различным видам техногенного воздействия. По био-

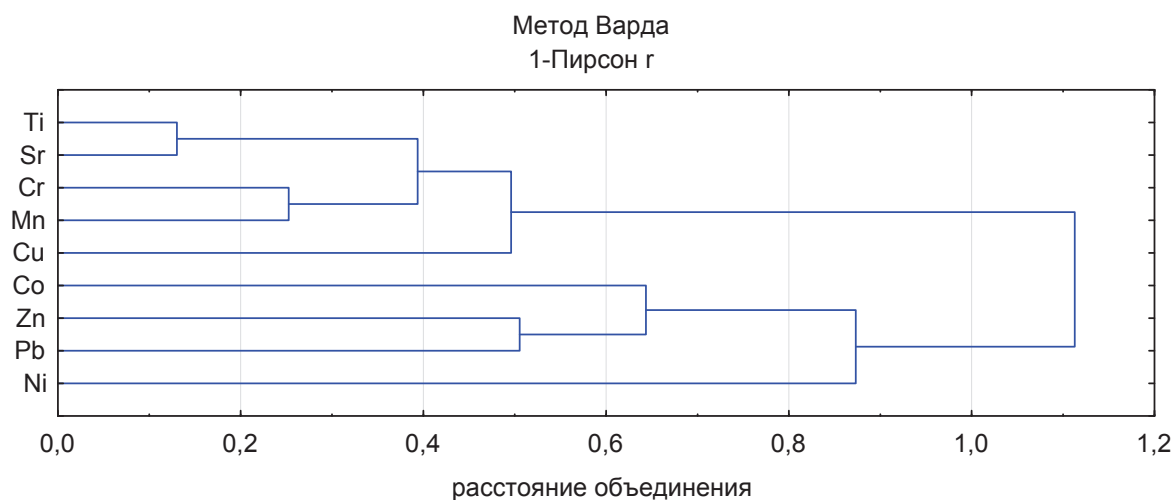


Рис. 2. Горизонтальная древовидная диаграмма изученных микроэлементов

Fig. 2. Horizontal tree diagram of the studied trace elements

геохимическим условиям миграции и аккумуляции микроэлементов в почвах северная лесостепь Tobol-Ишимского междуречья скорее тяготеет к гумидным подтаежным ландшафтам, нежели к аридным – степным. Достаточно высокая интенсивность биологического круговорота, низкая эродированность почв и однородность их гранулометрического состава, удаленность от крупных индустриальных центров значительно снижают риск химического загрязнения почв и водных объектов данной территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фоновое количество тяжелых металлов в почвах юга Западной Сибири / В.Б. Ильин, А.И. Сысо, Н.Л. Байдина, Г.А. Конарбаева, А.С. Черевко // Почвоведение. – 2003. – № 5. – С. 550–556.
2. Halicki W., Kulizhsky S.P. Changes in arable land use in Siberia in the 20th century and their effect on soil degradation // International Journal of Environmental Studies. – 2015. – V. 72. – № 3. – P. 456–473.
3. Сысо А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 278 с.
4. Ильин В.Б., Сысо А.И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. – 229 с.
5. Ильин В.Б. Геохимическая ситуация на территории Обь-Иртышского междуречья // Почвоведение. – 2007. – № 12. – С. 1442–1451.
6. Содержание тяжелых металлов в почвообразующих породах юга Западной Сибири / В.Б. Ильин, А.И. Сысо, Г.А. Конарбаева, Н.Л. Байдина, А.С. Черевко // Почвоведение. – 2000. – № 9. – С. 1086–1090.
7. Азаренко Ю.А., Красницкий В.М., Ермохин Ю.И. Эколого-агрохимическая оценка содержания микроэлементов в почвах и растениях лесостепной и степной зон Омской области // Плодородие. – 2010. – № 5. – С. 49–51.
8. Азаренко Ю.А. Закономерности содержания и распределения микроэлементов (Mn, Cu, Zn, Co, Mo, V) в почвах лесостепной и степной зон Омского Прииртышья // Омский научный вестник. – 2012. – № 2 (114). – С. 218–223.
9. Азаренко Ю.А., Рейнгард Я.Р. Содержание микроэлементов в почвах и почвенно-геохимическое районирование Омской области // Омский научный вестник. – 2012. – № 1 (108). – С. 188–192.
10. Каретин Л.Н. Почвы Тюменской области / под ред. С.С. Трофимова. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1990. – 289 с.
11. Ваймер А.А. Тяжелые металлы в почве и сельскохозяйственной продукции в условиях Тюменской области: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Тюмень, 1999. – 24 с.
12. Содержание тяжелых металлов в атмосферных осадках юга Тюменской области / Л.Н. Скипин, А.А. Ваймер, Ю.А. Квашнина, О.Г. Богданова, И.К. Судакова // Тезисы докладов «Окружающая среда». – Тюмень: Тюменский дом печати, 2006. – С. 54–68.
13. Морфоструктурное районирование Западно-Сибирской равнины: Атлас Тюменской области / гл. ред. Е.А. Огороднов. – 1:8 000 000. – Москва; Тюмень: ГУТК, 1971. – Вып. 1. – Лист 10.
14. Козин В.В., Гармаш А.А. Ландшафтная структура центральной части Ишимской равнины // Вестник Тюменского государственного университета. – 2011. – № 4. – С. 114–120.
15. Каретин Л.Н. Черноземные и луговые почвы Tobol-Ишимского междуречья. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1982. – 294 с.
16. Физико-географическое районирование Тюменской области / под ред. Н.А. Гвоздецкого. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. – 246 с.
17. Территория Омутинского муниципального района Тюменской области / Правительство Тюменской области. URL: http://omutinka.admtumen.ru/mo/Omutinka/about_OMSU/more.htm?id=10595411@cmsArticle (дата обращения: 12.12.2015).
18. Доклад о состоянии и использовании земель в Тюменской области в 2010 году / Управление Росреестра по Тюменской области. – Тюмень, 2011. – 76 с.
19. Шишов Л.Л. Классификация и диагностика почв России. – Смоленск: Ойкумена, 2004. – 342 с.
20. Теория и практика химического анализа почв / под ред. Л.А. Воробьевой. – М.: ГЕОС, 2006. – 400 с.
21. Shein E.V., Milanovskii E.Yu., Molov A.Z. The effect of organic matter on the difference between particle-size distribution data obtained by the sedimentometric and laser diffraction methods // Eurasian Soil Sci. – 2006. – № 39. – P. 84–90.
22. Innovative Technology Verification Report. XRT Technologies for Measuring Trace Elements in Soil and Sediment. Rontec Pico-tax XRF Analyzer / Tetra Tech EM Inc. – 2006. – 203 p. URL: <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P1000RJG.pdf> (дата обращения: 03.12.2015).
23. Towett E.K. Quantification of total element concentrations in soils using total X-ray fluorescence spectroscopy (TXRF) / E.K. Towett, K.D. Shepherd, G. Cadisch // Science of the Total Environment. – 2013. – № 463–464. – P. 374–388.
24. Total elemental composition of soils in Sub-Saharan Africa and relationship with soil forming factors (TXRF) / E.K. Towett, K.D. Shepherd, J.E. Tondoh, L.A. Winowiecki, T. Lulseged, M. Nyambura, A. Sila, T.-G. Vågen, G. Cadisch // Geoderma Regional. – 2015. – № 5. – P. 157–168.
25. Хренов В.Я. Почвы Тюменской области: словарь-справочник. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 156 с.
26. Щеглов Д.И. Микроэлементы в почвах сопряженных ландшафтов Каменной Степи различной степени гидроморфизма / Д.И. Щеглов, Н.С. Горбунова, Л.А. Семенова, О.А. Хатунцева // Почвоведение. – 2013. – №3. – С. 282–290.
27. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. – М.: Мир, 1989. – 439 с.

Поступила 23.12.2015.

Информация об авторах

Константинова Е.Ю., аспирант кафедры геоэкологии Института наук о Земле Тюменского государственного университета.

UDC 631.445.25 (550.42)

MICROELEMENTS IN SOILS OF FOREST-STEPPE SEQUENT SERIES IN CENTRAL PART OF TOBOL-ISHIM INTERFLUVE

Elizaveta Yu. Konstantinova,

konstantliza@gmail.com

University of Tyumen,

6, Volodarskogo Street, Tyumen, 625046, Russia.

The relevance of the research. Features of distribution and accumulation of trace elements, including heavy metals, in soils of agricultural landscapes is one of the most important directions of research in soil science, agricultural chemistry and geocology. These studies have a high relevance for the southern part of Tyumen region which is characterized by a strong agricultural specialization. Exploration of main features and factors of trace elements distribution in soils of agricultural landscapes can be important for the complex ecological and geochemical assessment of the territory, the refinement of the regional background levels of pollutants in soils, for development of special measures aimed for reduction of environmental risks and improvement of the quality of agricultural products.

The main aim of the study is to analyze the main geochemical features of distribution and accumulation of several trace elements (Ti, Cr, Mn, Ni, Co, Cu, Zn, Pb, Sr) in soils of agricultural landscapes located within the forest-steppe zone of Tobol-Ishim interfluve, depending on the differences in particle size distribution, humus content, pH values and position in the relief.

The methods used in study: field soil and landscape-geochemical studies, determination of pH values in soil-water suspension, particle size distribution analysis using pyrophosphate method (with a microprobe analyzer), definition of microelements total concentrations using TXRF method, determination of humus content by the Tyurin method, statistical processing of the data.

The results. The author has investigated the content and distribution of Ti, Cr, Mn, Ni, Co, Cu, Zn, Pb, and Sr in soils of agricultural landscapes for the territory of Tobol-Ishim interfluve. The data may indicate that soils of the central part of Tobol-Ishim interfluve are enriched in Cu, Pb, Co and depleted in Ni, Zn, Sr, Mn compared to the average content in soils and soil-forming rocks of the south of Western Siberia. It was revealed that soils of the plot, despite the provision in relief, are low-contrast in particle size distribution, and this soil attribute has virtually no effect on the distribution of trace elements.

Key words:

Microelements, heavy metals, forest-steppe, agrolandscape, Tyumen region, Western Siberia, Tobol-Ishim Interfluve.

REFERENCES

- Ilin V.B., Syso A.I., Baidina N.L., Konarbaeva G.A., Cherevko A.S. Background Concentrations of Heavy Metals in Soils of Southern Western Siberia. *Eurasian Soil Sci.*, 2003, no. 5, pp. 550–556. In Rus.
- Halicki W., Kulizhsky S.P. Changes in arable land use in Siberia in the 20th century and their effect on soil degradation. *International Journal of Environmental Studies*, 2015, vol. 72, no. 3, pp. 456–473.
- Syso A.I. *Zakonomernosti raspredeleniya khimicheskikh elementov v pochvoobrazuyushchikh porodakh i pochvakh Zapadnoy Sibiri* [Laws of distribution of chemical elements in the soil-forming rocks and soils of Western Siberia]. Novosibirsk, SB RAS Publ. House, 2007. 278 p.
- Ilin V.B., Syso A.I. *Mikroelementy i tyazhelye metally v pochvakh i rasteniyakh Novosibirskoy oblasti* [Trace elements and heavy metals in soils and plants of Novosibirsk Region]. Novosibirsk, SB RAS Publ. House, 2001. 229 p.
- Il'in V.B. Geochemical situation in the Ob'-Irtys' interfluve. *Eurasian Soil Sci.*, 2007, vol. 40, no. 12, pp. 1289–1297.
- Il'in V.B., Syso A.I., Konarbaeva G.A., Baidina N.L., Cherevko A.S. Heavy Metal Contents in Soil-Forming Rocks in the South of Western Siberia. *Eurasian Soil Sci.*, 2000, no. 9, pp. 1086–1090. In Rus.
- Azarenko Yu.A., Krasnitskiy V.M., Ermokhin Yu.I. Ecological and agrochemical estimation of trace elements in soils and plants of the forest-steppe and steppe zones of the Omsk region. *Plodородie*, 2010, no. 5, pp. 49–51. In Rus.
- Azarenko Yu.A. Laws of composition and distribution of microelements (Mn, Cu, Zn, Co, Mo, B) in soil of forest-steppe and steppe zones the Omsk Irtysh Region. *Omsk Scientific Bulletin*, 2012, no. 2 (114), pp. 218–223. In Rus.
- Azarenko Yu.A., Reingard Ya.R. Composition of microelements in soils and soil-geochemical zoning of Omsk oblast. *Omsk Scientific Bulletin*, 2012, no. 1 (108), pp. 188–192. In Rus.
- Karetin L.N. *Pochvy Tyumenskoy oblasti* [The soils of the Tyumen region]. Novosibirsk, Nauka SB Publ., 1990. 289 p.
- Vaymer A.A. *Tyazhelye metally v pochve i selskokhozyaystvennoy produkcii v usloviyakh Tyumenskoy oblasti. Avtoref. Dis. Kand. nauk* [Heavy metals in the soil and agricultural production in the conditions of the Tyumen region. Cand. Diss. abstract]. Tyumen, 1999. 24 p.
- Skipin L.N., Vaymer A.A., Kvashnina Yu.A., Bogdanova O.G., Sudakova I.K. Soderzhanie tyazhelykh metallov v atmosferykh osadkakh yuga Tyumenskoy oblasti [The content of heavy metals in precipitation in the south of Tyumen region]. *Tezisy dokladov «Okruzhayushchaya sreda»* [Abstracts of the conference «Environment»]. Tyumen, Tyumenskiy dom pechati Publ., 2006. pp. 54–68.
- Ogorodnov E.A. *Morfostrukturnoe rayonirovanie Zapadno-Sibirskoy ravniny: Atlas Tyumenskoy oblasti* [Morphostructural zoning of the West Siberian Plain: Atlas of Tyumen region]. Moscow; Tyumen, GUGK Publ., 1971. 45 p.
- Kozin V.V., Garmash A.A. Landscape structure of the central part of the Ishim Plain. *UT Research Journal*, 2011, no. 4, pp. 114–120. In Rus.
- Karetin L.N. *Chernozemnye i lugovye pochvy Tobol-Ishimskogo mezhdurechya* [Chernozem and meadow soils Tobol-Ishim interfluve]. Novosibirsk, Nauka SB Publ., 1982. 294 p.
- Gvozdetskiy N.A. *Fiziko-geograficheskoe rayonirovanie Tyumenskoy oblasti* [Physico-geographical division of Tyumen region]. Moscow, MSU Publ., 1973. 246 p.
- Territoriya Omutinskogo munitsipalnogo rayona Tyumenskoy oblasti* [The territory of Omutinskiy municipal district of Tyumen

- region]. Available at: http://omutinka.admtymen.ru/mo/Omutinka/about_OMSU/more.htm?id=10595411@cmsArticle (accessed 12 December 2015).
18. *Doklad o sostoyanii i ispolzovanii zemel v Tyumenskoy oblasti v 2010 godu* [Report on the status and use of land in Tyumen region in 2010]. Tyumen, Tyumen region Department of Rosreestr, 2011. 76 p.
 19. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* [Russian Soil Classification System]. Smolensk, Oykumena Publ., 2004. 342 p.
 20. Vorobeva L.A. *Teoriya i praktika khimicheskogo analiza pochv* [Theory and practice of soils chemical analysis]. Moscow, GEOS Publ., 2006. 400 p.
 21. Shein E.V., Milanovskii E.Yu., Molov A.Z. The effect of organic matter on the difference between particle-size distribution data obtained by the sedimentometric and laser diffraction methods. *Eurasian Soil Sci.*, 2006, no. 39, pp. 84–90.
 22. *Innovative Technology Verification Report. XRT Technologies for Measuring Trace Elements in Soil and Sediment. Rontec Picotax XRF Analyzer*. Tetra Tech EM Inc. Available at: <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P1000RJG.pdf> (accessed: 03 December 2015).
 23. Towett E.K., Shepherd K.D., Cadisch G. Quantification of total element concentrations in soils using total X-ray fluorescence spectroscopy (TXRF). *Sci. of the Total Environment*, 2013, vol. 463–464, pp. 374–388.
 24. Towett E.K., Shepherd K.D., Tondoh J.E., Winowiecki L.A., Lulseged T., Nyambura M., Sila A., Vågen Tor-G., Cadisch G. Total elemental composition of soils in Sub-Saharan Africa and relationship with soil forming factors (TXRF). *Geoderma Reg.*, 2015, vol. 5, pp. 157–168.
 25. Khrenov V.Ya. *Pochvy Tyumenskoy oblasti: slovar-spravochnik* [The soils of the Tyumen region: Glossary]. Ekaterinburg, UB RAS Publ., 2002. 156 p.
 26. Shcheglov D.I., Gorbunova N.S., Semenova L.A., Khatuntseva O.A. Microelements in soils of conjugated landscapes with different degrees of hydromorphism in the Kamennaya Steppe. *Eurasian Soil Sci.*, 2013, vol. 46, no. 3, pp. 254–261.
 27. Kabata-Pendias A., Pendias X. *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh* [Trace elements in soils and plants]. Moscow, Mir Publ., 1989. 439 p.

Received: 23 December 2015.

Information about the authors

Elizaveta Yu. Konstantinova, graduate student, Tyumen State University.

УДК 662.8.05

ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БРИКЕТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ СЛАНЦЕВОЙ МЕЛОЧИ И ДРЕВЕСНЫХ ОПИЛОК

Назаренко Максим Юрьевич¹,

max.nazarenko@mail.ru

Кондрашева Наталья Константиновна¹,

natalia_kondrasheva@mail.ru

Салтыкова Светлана Николаевна¹

ssn_58@mail.ru

Бажин Владимир Юрьевич¹,

bazhin_alfoil@mail.ru

¹ Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,
Россия, г. Санкт-Петербург, 199106, 21-я линия В.О., 2.

Актуальность работы объясняется необходимостью переработки большого количества отходов сланцепереработки и деревообрабатывающей промышленности – сланцевой мелочи и древесных опилок, которые усложняют технологические схемы переработки данных материалов.

Цель работы: определение оптимальных условия для брикетирования сланцевой мелочи и изучение влагонасыщаемости топливных брикетов и гранул, полученных из древесных опилок.

Методы исследований. Используется современное лабораторное оборудование: гранулометрический классификатор ASControl, лабораторный гидравлический пресс ПГЛ-20, муфельная печь SNOL-8.2/1100. Определение прочностных характеристик полученных сланцевых брикетов проводилось согласно стандартной методике по ГОСТ 21289-75 «Брикеты угольные. Методы определения механической прочности». Брикет помещали между цилиндрическими вставками прессы так, чтобы вставки упирались в центры его параллельной поверхности, доводили брикет до разрушения. Поскольку в горючих сланцах содержится до 50 % минеральных примесей, что приводит к увеличению прочности брикетов, число сбрасываний было увеличено с 4 (по ГОСТ 21289-75) до количества, приводящего к полному разрушению брикетов. Термоустойчивость (не разрушаются при термической обработке) сланцевых брикетов определялась при температуре 800–1000 °С.

Результаты. Изучено влияние фракционного состава и давления брикетирования на прочностные характеристики сланцевых брикетов, а также определена зависимость влагонасыщаемости топливных брикетов из древесных опилок от способа их изготовления (сухого или горячего). Определены оптимальные условия для брикетирования сланцевой мелочи различной крупности. Для фракции менее 125 мкм: влажность материала 37 %, давление брикетирования 15 МПа. Брикет имеет механические характеристики: сопротивление удару – выдерживает 6 падений, сопротивление на сжатие – $\sigma_{сж}=5$ кг/см², термоустойчив при температуре 800–1000 °С. Для смеси фракций (1:1) 2 мм – 125 мкм и менее 125 мкм: влажность материала 23 %, давление брикетирования 15 МПа. Брикет имеет механические характеристики: сопротивление удару – выдерживает 4 падения, сопротивление на сжатие – $\sigma_{сж}=3$ кг/см², термоустойчив при температуре 800–1000 °С.

Ключевые слова:

Горючие сланцы, древесные опилки, утилизация отходов, брикетирование, сланцевые брикеты, топливные брикеты, пеллеты, рациональное природопользование.

Постоянный рост энергопотребления, уменьшение известных запасов легкодоступной нефти, увеличение сернистости и обводненности нефти и, что самое важное, увеличение себестоимости добычи нефти вследствие преобладания труднодоступных запасов и большой выработанности действующих месторождений повышает интерес к нетрадиционным и низкосортным видам топлива, одними из которых являются горючие сланцы и древесный уголь [1, 2]. При добыче и переработке горючих сланцев, а также при переработке древесины образуется большое количество сланцевой мелочи и древесных опилок, использование которых усложняет технологические схемы переработки горючих сланцев и древесины, в результате чего сланцевая мелочь и опилки складываются на территории заводов в отвалы [3–5].

Производство топливных гранул и брикетов из древесных опилок является одним из оптимальных способов их утилизации. Крупнейшими производителями топливных гранул из древесных опилок в мире являются такие страны, как США (2000 тыс. тонн в год), Швеция (700 тыс. тонн в год), Дания (600 тыс. тонн в год), Австрия (120 тыс. тонн в год), Германия (100 тыс. тонн в год), Канада (100 тыс. тонн в год) [6–8].

Топливные брикеты, пеллеты и гранулы имеют ряд преимуществ: при сжигании топливных гранул выбрасывается в воздух такое же количество углекислого газа, какое впитало в себя дерево при росте – закрытый кругооборот углерода; исключен риск загрязнения окружающей среды из-за аварии при транспортировке; невысокая себестоимость готовой продукции [9, 10]. При транспортировке

на большие расстояния, а также при складировании готовых топливных пеллет, брикетов или гранул во влажных помещениях существует проблема разрушения готовой продукции в результате влагонасыщения и, соответственно, снижения теплоэнергетических и потребительских свойств.

Мировые запасы горючих сланцев в эквиваленте сланцевой смолы и газа существенно больше запасов нефти и природного газа. Россия имеет большие по объему месторождения горючих сланцев, по количеству которых ее опережают только США и Бразилия [3, 5, 11]. Технологии переработки горючих сланцев в электроэнергию и химическое сырье используют такие страны, как Бразилия, Эстония, Америка, Китай и т. д.

Многие исследователи [12–20] говорят об образовании большого количества сланцевой мелочи, для которой необходимо найти способы утилизации. В качестве такого способа можно рассматривать производство брикетов, что позволит увеличить эффективность использования материала, например отходов металлургии или низкосортного сырья. Поэтому цель данной работы, исходя из вышесказанного, – определение оптимальных условий для брикетирования сланцевой мелочи и изучение влагонасыщаемости топливных брикетов и гранул, полученных из древесных опилок. За оптимальные условия брикетирования сланцевой мелочи принимали условия, при которых сланцевые брикеты обладали наилучшими механическими характеристиками сопротивления удару и сжатию. Высокие механические свойства сланцевых брикетов облегчают их транспортировку и повышают эксплуатационные свойства. При проведении исследований решены следующие задачи:

- изучено влияние фракционного состава и давления брикетирования на прочностные характеристики (сопротивление удару и на сжатие) полученных сланцевых брикетов;
- изучено влияние фракционного состава и способа изготовления (сухого или горячего) на влагонасыщаемость топливных брикетов из древесных опилок.

Методы исследований

Объектом исследования служила сланцевая мелочь Прибалтийского бассейна (Ленинградского и Эстонского месторождений) и древесные опилки. Перед началом исследований сланцевая мелочь и древесные опилки классифицировались на фракции крупностью от 6 до 4 мм, от 4 до 2 мм, от 2 до 1 мм, от 1 до 0,5 мм, от 0,5 до 0,25 мм, от 0,2 до 0,125 мм и на фракцию менее 0,125 мм с использованием гранулометрического классификатора AS-Control-200.

Сланцевую мелочь и древесные опилки брикетировали на лабораторном гидравлическом прессе ПГЛ-20 при давлении 10 и 15 МПа с предварительным смачиванием материала или без смачивания (для сланцевой мелочи). Определение прочностных

характеристик полученных сланцевых брикетов проводилось согласно стандартной методике (ГОСТ 21289-75) «Брикеты угольные. Методы определения механической прочности». Брикет помещали между цилиндрическими вставками прессы так, чтобы вставки упирались в центры его параллельной поверхности, и доводили его до разрушения. Поскольку в горючих сланцах содержится до 50 % минеральных примесей, что приводит к увеличению прочности брикетов, число сбрасываний было увеличено с 4 (по ГОСТ 21289-75) до количества, приводящего к полному разрушению брикетов. Термостойкость сланцевых брикетов (не разрушаются при термической обработке) определялась при температуре 800–1000 °С в муфельной печи SNO-8.2/1100.

Брикетирование древесных опилок производилось с предварительным нагревом при 105 °С в течение 15 мин (горячее брикетирование) и без нагрева (холодное брикетирование) пресс-формы с опилками с добавлением или без добавления 0,05 мл масла на 5 г опилок. Изучалось влияние масла на понижение влагонасыщаемости и улучшение их механических характеристик. Вместо пихтового масла, использованного в данной работе, возможно применение любого другого, например вазелинового или скипидарного.

Определение влагонасыщаемости полученных топливных брикетов проводилось с использованием эксикатора, заполненного частично водой, в который брикеты помещались на 72 часа. По истечении времени рассчитывалось изменение массы брикетов.

Результаты экспериментов и обсуждение

В табл. 1 приведены результаты экспериментов по влиянию состава и давления брикетирования на прочностные характеристики брикетов. Использовались фракции сланцевой мелочи – от 2 мм до 125 мкм и менее 125 мкм, увеличение фракции при прессовании увеличивает износ деталей прессы и расход энергии на раздавливание.

По табл. 1 видно, что с увеличением влажности брикетизируемого материала фракцией менее 125 мкм с 11,6 до 37 % и при повышении давления брикетирования с 10 до 15 МПа улучшаются механические (прочностные) характеристики сланцевых брикетов.

По результатам эксперимента установлено, что оптимальным для брикетирования является горючий сланец фракции менее 125 мкм, с влажностью 37 %, давление при брикетировании – 15 МПа. Полученный брикет имеет следующие механические характеристики:

- сопротивление удару – выдерживает 6 падений;
- сопротивление на сжатие $\sigma_{сж} = 5 \text{ кг/см}^2$;
- термостойчив при температуре 800–1000 °С.

На рис. 1 показаны примеры разрушения брикетов, сформованных при различном давлении,

Таблица 1. Влияние состава и давления на прочностные характеристики

Table 1. The effect of composition and pressure on strength characteristics

| Условия изготовления брикета Conditions of briquetting | | | Физические свойства Physical properties | | |
|---|--|--------------------------------|---|--|--|
| Состав брикета Briquette structure | Влажность материала, % Water content, % | Давление, МПа Pressure, MPa | Механическая прочность Mechanical strength | | Термоустойчивость (при 800–1000 °С) Heat resistance (under 800–1000 °С) |
| | | | Сопротивление удару, кол. пад. Shock resistance, quantity of falls | Сопротивление сжатию, кг/см ² Compression resistance, kg/cm ² | |
| Фракция от 2 мм до 125 мкм / Fraction is from 2 mm to 125 mkm | | | | | |
| Горючий сланец Oil shale | 11,6 | 10–15 | 1 | 0,5 | Разрушился Briquette is broken |
| Горючий сланец и вода Oil shale and water | 37 | | 2 | | |
| Фракция менее 125 мкм / Fraction is less than 125 mkm | | | | | |
| Горючий сланец Oil shale | 11,6 | 10 | 1 | 0,5 | Разрушился Briquette is broken |
| | | 15 | 2 | 0,7 | |
| Горючий сланец и вода Oil shale and water | 37 | 10 | 5 | 4,0 | Не разрушился Briquette is not broken |
| | | 15 | 6 | 5,0 | |

при определении сопротивления на удар. При этом необходимо отметить, что брикеты с крупностью фракций менее 125 мкм (влажность 37 %, давление 10–15 МПа, выдерживают до 6 падений) прочнее брикетов с крупностью фракций 125 мкм – 2 мм (влажность 11,6 %, давление 10–15 МПа). Последние разрушаются после первого сбрасывания. На прочность брикетов оказывает влияние влажность, крупность фракции и давление прессования. Кроме того, с уменьшением крупности фракции достигается более плотная упаковка, увеличивается суммарная поверхность частиц, а влажность и давление прессования увеличивают силы сцепления между зёрнами.

Для эффективного использования сланцевой мелочи различной крупности дополнительно были проведены исследования по брикетированию материала следующего фракционного состава: 50 % фракции 2 мм – 125 мкм и 50 % – менее 125 мкм. При увеличении размера фракции необходимо увеличение давления и времени брикетирования, поэтому при исследовании максимальная крупность фракции была от 2 мм до 125 мкм. Результаты эксперимента приведены в табл. 2.

При рациональном фракционном составе крупностью менее 125 мкм и 2 мм – 125 мкм (в соотношении 1:1) оптимальная влажность материала – 23 %. Полученный сланцевый брикет имеет следующие механические характеристики:

- сопротивление удару – выдерживает 4 падения;
- сопротивление на сжатие $\sigma_{сж} = 3 \text{ кг/см}^2$;
- термоустойчив при температуре 800–1000 °С.

Далее в работе представлены результаты изучения влагонасыщаемости полученных сланцевых

брикетов и брикетов из отходов деревообрабатывающей промышленности, полученных методом холодного и горячего брикетирования. Влияние фракционного состава древесных опилок, способа брикетирования (холодного/горячего) и добавки масла на влагонасыщаемость топливных брикетов представлены на рис. 2.

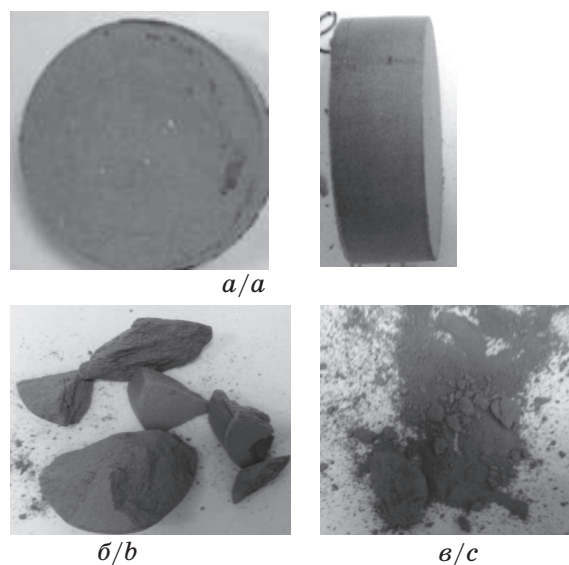


Рис. 1. Результаты механических испытаний полученных сланцевых брикетов при давлении: а) 15 МПа, фракция менее 125 мкм; б) 15 МПа, выдержал 6 сбрасываний; в) 10 МПа, выдержал 5 сбрасываний

Fig. 1. Results of mechanical tests of the obtained shale briquettes at pressure: a) 15 MPa, fraction is less than 125 mkm; b) 15 MPa (6 falls); c) 10 MPa (5 falls)

Таблица 2. Результаты исследований брикетирования (давление 15 МПа)

Table 2. The results of briquetting research (pressure is 15 MPa)

| Условия изготовления брикета Conditions of briquetting | | Физические свойства Physical properties | | |
|---|--|---|--|--|
| Состав брикета Briquette structure | Влажность материала, % Water content, % | Механическая прочность Mechanical strength | | Термоустойчивость (при 800–1000 °С) Heat resistance (under 800–1000 °С) |
| | | Сопротивление удару, кол. пад. Shock resistance, quantity of falls | Сопротивление сжатию, кг/см ² Compression resistance, kg/cm ² | |
| Горючий сланец Oil shale | 8 | 1 | 0,5 | Разрушился Briquette is broken |
| | 11,6 | 2 | 1,0 | |
| Горючий сланец и вода Oil shale and water | 23 | 4 | 3,0 | Не разрушился Briquette is not broken |
| | 37 | 2 | 1,0 | |
| | 40 | 2 | 1,0 | |

По полученным данным (рис. 2) видно, что топливные брикеты, изготовленные горячим брикетированием, обладают большей влагонасыщаемостью по сравнению с брикетами, изготовленными холодным брикетированием. При добавлении пихтового масла тенденция эта сохраняется. Это объясняется тем, что при горячем брикетировании (температура 105 °С) удаляется влага из опилок и впоследствии топливные брикеты вбирают влагу из окружающей среды в большей степени, чем брикеты при холодном брикетировании.

Наибольшая влагонасыщаемость при холодном брикетировании без добавления пихтового масла

наблюдается у брикетов при использовании фракции 1 мм, а наименьшая – при 0,125–0,250 мм, при добавлении пихтового масла – максимальная у брикетов при использовании фракции 1 мм, наименьшая – 0,125–0,250 мм. При горячем брикетировании без добавления пихтового масла максимальная влагонасыщаемость у брикетов при использовании фракции 0,5 мм, а наименьшая – 0,125–0,250 мм. При добавлении пихтового масла максимальная – 0,5 мм, наименьшая – 0,125–0,250 мм.

В табл. 3 представлены данные по изучению влагонасыщаемости полученных сланцевых брикетов.

Таблица 3. Результаты изучения влагонасыщаемости полученных брикетов

Table 3. The results of the study of the obtained briquettes water saturation

| Условия изготовления брикета Conditions of briquetting | | | Влагонасыщаемость, % Water saturation, % |
|---|--|--------------------------------|---|
| Состав брикета Briquette structure | Влажность материала, % Water content, % | Давление, МПа Pressure, MPa | |
| Фракция от 2 мм до 125 мкм / Fraction is from 2 mm to 125 mkm | | | |
| Горючий сланец Oil shale | 11,6 | 10–15 | 12–15 |
| Горючий сланец и вода Oil shale and water | 37 | | 2–3 |
| Фракция менее 125 мкм / Fraction is less than 125 mkm | | | |
| Горючий сланец Oil shale | 11,6 | 10 | 8–10 |
| | | 15 | 7–9 |
| Горючий сланец и вода Oil shale and water | 37 | 10 | 2–3 |
| | | 15 | |

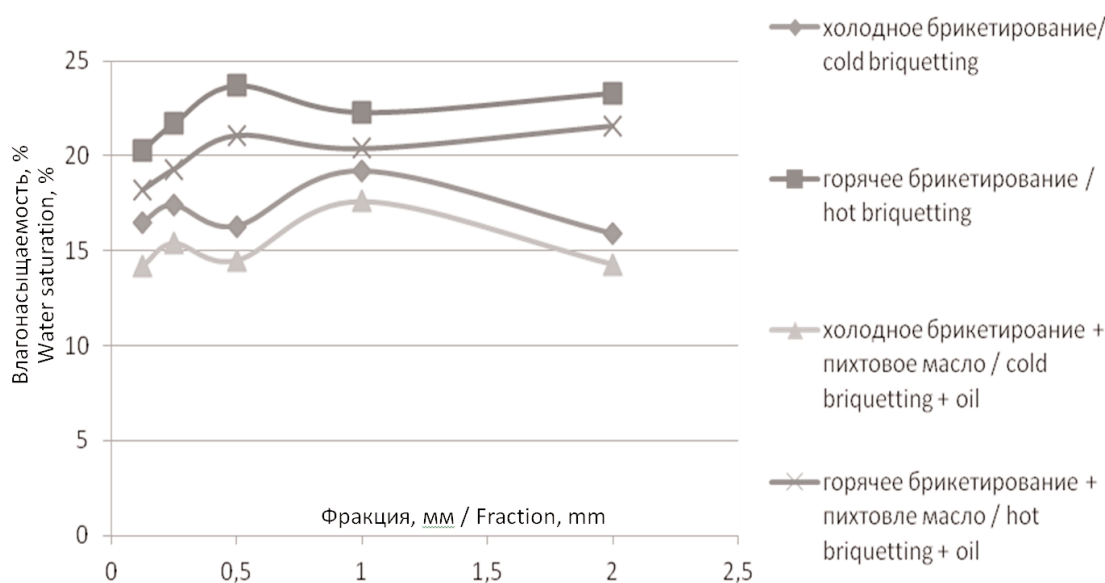


Рис. 2. Влагонасыщаемость топливных гранул

Fig. 2. Water saturation of fuel pellets

Заключение

По результатам экспериментальных исследований были определены:

- 1) оптимальные условия для брикетирования сланцевой мелочи:
 - фракция менее 125 мкм, влажность материала 37 %, давление брикетирования 15 МПа, брикет имеет механические характеристики: сопротивление удару – выдерживает 6 падений, сопротивление на сжатие – $\sigma_{сж}=5$ кг/см², термоустойчив при температуре 800–1000 °С;
 - фракция 2 мм – 125 мкм и менее 125 мкм (1:1), оптимальная влажность материала – 23 %, давление брикетирования 15 МПа, брикет имеет механические характеристики: сопротивление удару – выдерживает 4 падения, сопротивление на сжатие – $\sigma_{сж}=3$ кг/см², термоустойчив при температуре 800–1000 °С.
- 2) установлено:
 - сланцевая мелочь брикетируется без добавления связующих веществ, что снижает себестоимость готовой продукции;

- увеличение давления брикетирования (с 10 до 15 МПа) и влажности материала (с 11,6 до 37 %) улучшает прочностные характеристики брикетов;
- брикетирование сланцевой мелочи можно осуществлять без предварительной сушки материала, так как капиллярные силы адсорбированной жидкости обеспечивают необходимое сцепление поверхности частиц материала.

Топливные брикеты из древесных опилок, изготовленные горячим брикетированием, обладают большей влагонасыщаемостью, по сравнению с брикетами, изготовленными холодным брикетированием. Добавление масла, например пихтового, снижает влагонасыщаемость топливных брикетов, независимо от способа брикетирования, но практически не оказывает влияние на вид кривой влагонасыщаемости. Наибольшая влагонасыщаемость при холодном брикетировании наблюдается у брикетов при использовании фракции 1 мм, а при горячем брикетировании максимальная влагонасыщаемость при использовании фракции 0,5 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грушевенко Е. Сланцевая нефть в США: к чему приведет снижение цен // Forbes. URL: <http://www.forbes.ru/mneniya-column/komkurentsia/278477-slantsevaya-neft-v-ssha-k-chemu-privedet-snizhenie-tsen> (дата обращения: 25.12.2015).
2. Composition and properties of oil shale ash concrete / R. Leimbi-Merike, H. Tiina, L. Eneli, K. Rein // Oil shale. – 2014. – V. 31. – № 2. – P. 147–160.
3. Юдович Я.Э. Горючие сланцы Республики Коми. Проблемы освоения // Сыктывкар: Геопринт, 2013. – 90 с.
4. Обзор методов и конструкций по утилизации древесных отходов для создания машины по производству пеллет / В.А. Костырченко, Т.М. Мадьяров, М.А. Слезов, А.П. Васильев // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 11–1. – С. 66–70.
5. Антонина З. Химические технологии. – Иыхви, 2012. – 376 с.
6. Кошкалов Е.С., Савицкий С.К. Пеллеты – современный альтернативный источник энергии // Решение. – 2015. – № 2. – С. 224–226.
7. Рудаков Ю.А. Древесные пеллеты как альтернатива углеводородным источникам // Инновации и инвестиции. – 2013. – № 6. – С. 180–182.
8. Руденко С.А., Репин О.М. Исследование российского рынка древесных пеллет: сырьевой аспект // Вестник НГУЭУ. – 2014. – № 1. – С. 262–271.
9. Гомонай М.В. Производство топливных брикетов. Древесное сырье, оборудование, технологии, режимы работы: монография. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2006. – 68 с.
10. Сафонов А.О., Зотова Е.В. Анализ методик оценки физико-механических и тепловых характеристик древесных пеллет // Лесотехнический журнал. – 2014. – № 5 (13). – С. 113–126.
11. Минерально-сырьевые ресурсы России и мировой опыт природопользования / Т.С. Смирнова, Л.М. Вахилова, Ш.Н.У. Мирабидинов, С.А. Молотов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – № 7. – С. 7–17.
12. Изучение физико-химических свойств горючих сланцев / М.Ю. Назаренко, В.Ю. Бажин, С.Н. Салтыкова, Г.В. Коновалов // Кокс и Химия. – 2014. – № 3. – С. 44–49.
13. Рудина М.Г., Серебрянникова Н.Д. Справочник сланцепереработчика. – Л.: Химия, 1988. – 256 с.
14. Зюба О.А., Глушенко О.Н. Обзор современных термических методов переработки горючих сланцев и экологические аспекты их применения // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2012. – Т. 7. – № 4. URL: http://www.ngtp.ru/rub/9/52_2012.pdf (дата обращения: 20.01.2016).
15. Geochemistry of rare earth and other trace elements in Chinese oil shale / Q. Wang, J. Bai, J. Ge, Y.Z. Wie, S. Li // Oil shale. – 2014. – V. 31. – № 3. – P. 266–277.
16. Стрижакова Ю.А., Усова Т.В., Третьяков В.Ф. Горючие сланцы – потенциальный источник сырья для топливно-энергетической и химической промышленности // Вестник МИТХТ. Химия и технология органических веществ. – 2006. – № 4. – С. 76–85.
17. Kinetics of isothermal and non-isothermal pyrolysis of oil shale / Y. Xie, H. Xue, H. Wang, Z. Lie, C. Rang // Oil shale. – 2011. – V. 28. – № 3. – P. 415–424.
18. Raado L-M., Rein K., Hain T. Oil shale ash based stone formation – hydration, hardening dynamics and phase transformations // Oil shale. – 2014. – V. 31. – № 1. – P. 91–101.
19. Palayangoda S.S., Nguen Q.P. Thermal behavior of raw oil shale and its components // Oil shale. – 2015. – V. 32. – № 2. – P. 160–171.
20. Study on thermal conversion of Huadian oil shale under N₂ and CO₂ atmospheres / F.F. Xie, Z. Wang, W.G. Lin, W.L. Song // Oil shale. – 2010. – V. 27. – № 4. – P. 309–320.

Поступила 21.01.2016 г.

Информация об авторах

Назаренко М.Ю., аспирант кафедры химических технологий и переработки энергоносителей факультета переработки минерального сырья Национального минерально-сырьевого университета «Горный».

Кондрашева Н.К., доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой химических технологий и переработки энергоносителей факультета переработки минерального сырья Национального минерально-сырьевого университета «Горный».

Салтыкова С.Н., кандидат технических наук, доцент кафедры химических технологий и переработки энергоносителей факультета переработки минерального сырья Национального минерально-сырьевого университета «Горный».

Бажин В.Ю., доктор технических наук, профессор, декан, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств энергоносителей факультета переработки минерального сырья Национального минерально-сырьевого университета «Горный».

UDC 662.8.05

PHYSICAL CHARACTERISTICS OF BRIQUETTES PRODUCED FROM SHALE FINES AND SAWDUST

Maxim Yu. Nazarenko¹,

max.nazarenko@mail.ru

Natalia K. Kondrasheva¹,

natalia_kondrasheva@mail.ru

Svetlana N. Saltykova¹,

ssn_58@mail.ru

Vladimir Yu. Bazhin¹,

bazhin_alfoil@mail.ru

¹ National mineral resources university (University of mines),
2, 21 line of Vasilyevsky Island, Saint-Petersburg, 199106, Russia.

The relevance of the research is caused by the necessity of treatment of great amount of waste of oil shale processing and wood industries – shale fines and sawdust, which complicates the technological scheme of processing these materials.

The main aim of the study is to determine the optimal conditions for briquetting oil shale fines and to study water saturation of fuel briquettes and pellets produced from wood sawdust.

The methods used in the study. The authors have used modern laboratory equipment (granulometric classificatory ASControl, laboratory hydraulic press PVL-20, muffle furnace SNOL-8.2/1100). Determining the strength characteristics of the obtained briquettes of oil shale was carried out according to standard methods by the GOST 21289-75 «Coal briquettes. Methods for determination of mechanical strength». The briquette was placed between the cylindrical inserts of the press in the way that the insert rests on the centers of its parallel surface and brings the preform to fracture. As the oil shale contains up to 50 % of mineral impurities, the authors decided to increase the number of drops from 4 (according to the State Standard 21289-75) up to a maximum amount. Oil shale briquette thermal stability (they are not broken at thermal treatment) was determined at 800–1000 °C.

The results. The author studied the influence of fractional composition and pressure of briquetting on strength characteristics (shock and compression resistance) of the obtained oil shale briquettes and determined the dependence of water saturation of briquettes made of wood sawdust on the method of their production (dry or not). The authors determined the optimal conditions for briquetting oil shale fines of different composition and grain size of the material: fraction is less than 125 mkm, water content is 37 %, pressure is 15 MPa; the obtained briquette has mechanical characteristics: shock resistance is 6 quantity of falls, compression resistance is 5 kg/cm², thermal stability is at 800–1000 °C; fraction is less than 125 mkm and from 2 mm to 125 mkm (1:1), water content is 23 %, pressure is 15 MPa, the obtained briquette has mechanical characteristics (shock resistance is 4 quantity of falls, compression resistance is 3 kg/cm²), thermal stability is at 800–1000 °C.

Key words:

Oil shale, sawdust, waste reclamation, briquetting, oil shale briquettes, fuel briquettes, pellets, rational use of natural resources.

REFERENCES

1. Glushenko E. Slanshevay neft v SSHA: k chemu privedet snizhenie zen [Oil shale in the USA: What is this going to lead to?]. *Forbes*. Available at: <http://www.forbes.ru/mneniya-column/komkurentsia/278477-slantsevaya-neft-v-ssha-k-chemu-privedet-snizhenie-tsen> (accessed 25 December 2015).
2. Leimbi-Merike R., Tiina H., Eneli L., Rein K. Composition and properties of oil shale ash concrete. *Oil shale*, 2014, vol. 31, no. 2, pp. 147–160.
3. Yudovich Ya.E. *Goruchie slantsy Respubliki Komi. Problemy osvoeniy* [Oil shale of the Komi Republic. Problems of development]. Syktyvkar, Geoprint Publ., 2013. 90 p.
4. Kostyrchenko V.A., Madyarov T.M., Slezov M.A., Vasilev A.P. Review of methods and structures for wood waste disposal to develop a machine for producing pellets. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2015, no. 11–1, pp. 66–70. In Rus.
5. Antonina Z. *Khimicheskie tekhnologii* [Chemical technology]. Jõhvi, 2012. 376 p.
6. Koshkalov E.S., Savitsky S.K. Pellety – sovremenny alternativny istochnik energii [Pellets is a modern alternative source of energy]. *Reshenie*, 2015, no. 2, pp. 224–226.
7. Rudakov Yu.A. Wood pellets as an alternative to hydrocarbon sources. *Innovatsii i investitsii*, 2013, no. 6, pp. 180–182. In Rus.
8. Rudenko S.A., Repina O.M. Study of the Russian market of wood pellets: raw aspect. *Vestnik NGUEU*, 2014, no. 1, pp. 262–271.
9. Gomonay M.V. *Proizvodstvo toplivnykh briketov. Drevsnoe syre, oborudovanie, tekhnologii, rezhimy raboty: monografiya* [Production of fuel briquettes. Wood raw materials, equipment, technologies, modes of work: monograph]. Moscow, GOU VPO MGUL Press, 2006. 68 p.
10. Safronov A.O., Zotova E.V. Analysis of methods for assessing physical-mechanical and thermal characteristics of wood pellets. *Lesohimicheskii zhurnal*, 2014, no. 5 (13), pp. 113–126. In Rus.
11. Smirnova T.S., Vakhidova L.M., Mirabidinov Sh.N.U., Molotov S.A. Mineral resources of Russia and the world experience of nature management. *PNRPU Mechanics Bulletin. Geology. Oil and gas engineering and mining*, 2013, no. 7, pp. 7–17. In Rus.
12. Nazarenko M.Yu., Bazhin V. Yu., Saltikova S.N., Kononov G.V. Physicochemical properties of fuel shale. *Coke and Chemistry*, 2014, vol. 57, no. 3, pp. 129–133. In Rus.
13. Rudina M.G., Serebrannikova N.D. *Spravochnik slantsepererabotchika* [Handbook of shale converter]. Leningrad, Khimiya, 1998. 256 p.
14. Zuba O.A., Gluschenko O.N. Review of modern thermal methods of oil shale processing and ecological aspects of their application. *Neftegazovay geologiya. Teoria i praktika*, 2012, vol. 7, no. 4.

- Available at: http://www.ngtp.ru/rub/9/52_2012.pdf (accessed 20 January 2016). In Rus.
15. Wang Q., Bai J., Ge J., Wie Y.Z., Li S. Geochemistry of rare earth and other trace elements in Chinese oil shale. *Oil shale*, 2014, vol. 31, no. 3, pp. 266–277.
 16. Strizhakova Yu.A., Usova T.V., Tretiykov V.F. Oil shale is a potential source of raw material for energy and chemical industry. *Vestnik MITHT. Chemistry and technology of organic substances*, 2006, no. 4, pp. 76–85. In Rus.
 17. Xie Y., Xue H., Wang H., Lie Z., Rang C. Kinetics of isothermal and non-isothermal pyrolysis of oil shale. *Oil shale*, 2011, vol. 28, no. 3, pp. 415–424.
 18. Raado L-M., Rein K., Hain T. Oil shale ash based stone formation – hydration, hardening dynamics and phase transformations. *Oil shale*, 2014, vol. 31, no. 1, pp. 91–101.
 19. Palayangoda S.S., Nguen Q.P. Thermal behavior of raw oil shale and its component. *Oil shale*, 2015, vol. 32, no. 2, pp. 160–171.
 20. Xie F.F., Wang Z., Lin W.G., Song W.L. Study on thermal conversion of Huadian oil shale under N₂ and CO₂ atmospheres. *Oil shale*, 2010, vol. 27, no. 4, pp. 309–320.

Received: 21 January 2016.

Information about the authors

Maxim Yu. Nazarenko, graduate student, National Mineral Resources University (University of mines).

Natalia K. Kondrasheva, Dr.Sc., professor, Head of the Department, National Mineral Resources University (University of mines).

Svetlana N. Saltykova, Cand.Sc., assistant professor, National Mineral Resources University (University of mines).

Vladimir Yu. Bazhin, Dr.Sc., professor, Dean, Head of Department, National Mineral Resources University (University of mines).

УДК 669.226.9

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ДЕКОРИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СЕРЕБРА

Галанин Сергей Ильич¹,
sgalanin@mail.ru

Висковатый Иван Сергеевич¹,
fenikus19@rambler.ru

¹ Костромский государственный технологический университет,
Россия, 156005, г. Кострома, ул. Дзержинского, 17а.

Актуальность работы обусловлена необходимостью усовершенствования методов декоративной обработки серебра и его сплавов. Подавляющее большинство анодных электрохимических процессов, проводимых с целью модификации свойств металлических поверхностей, проходят при образовании новых фаз на поверхности анода (обрабатываемого изделия). Использование коротких импульсов тока (миллисекундного диапазона длительностей) прямоугольной формы для анодных процессов позволяет гибко воздействовать на протекание явлений на границе раздела «металл–электролит».

Цель работы: формирование декоративных фактур и плёнок на поверхности серебра 925 пробы в тиосульфатном электролите с использованием импульсных токов. Исследование процессов, проходящих на границе раздела «металл–электролит» при процессе анодного электрохимического декорирования стерлингового серебра.

Методы исследования: моделирование процесса импульсной электрохимической обработки; фотофиксация микрогеометрических параметров на микроскопах МИС-11 и МИИ-4; регистрация амплитудно-временных параметров импульсов на осциллографе GRS-6052A; рентгеноструктурное определение размеров кристаллитов (зёрен) плёнки на дифрактометре ДРОН УМ-1; фотокolorиметрия с использованием программных пакетов ColorPicker Eyedropper, ColorHexa – Color Information and Conversion.

Результаты. Исследованы особенности процессов анодного электрохимического декорирования в тиосульфатном электролите с использованием униполярного и биполярного импульсных токов. Выявлено, что электрохимическое фактурирование, как и электрохимическое полирование, проходит при параллельных процессах пассивации и активации поверхности. Выявлена зависимость результата обработки от состава и микроструктуры сплава. Исследован состав и структура формируемой анодной плёнки. Предложены методы формирования мелко-, средне- и крупноразмерных декоративных фактур поверхности и цветных оксидных плёнок, обладающих высокими декоративными свойствами, на поверхности стерлингового серебра.

Ключевые слова:

Электрохимическая импульсная обработка, анодная электрохимическая обработка, пассивность, фактурирование поверхности, оксидные плёнки.

Введение

Дизайн – это деятельность, синтез проектного мышления и творчества, целью которой является определение формальных качеств промышленных изделий (промышленный дизайн). Эти качества включают и внешние черты изделия, но главным образом те структурные и функциональные взаимосвязи, которые превращают изделие в единое целое как с точки зрения потребителя, так и с точки зрения изготовителя [1].

Одно из наиболее наглядных проявлений дизайнерской деятельности – придание проектируемым предметам эстетических качеств. Красота – коренной признак и свойство дизайнера, так как дизайн соединяет материально-технические качества с принципом эстетической ценности. Продукт дизайнера всегда обладает качеством красоты, как красоты идеи или замысла, положенного в основу проекта, так и чисто визуальной [2].

На сегодняшний день известно много способов обработки металлической поверхности ювелирно-художественных изделий (ЮХИ), таких как полирование, сатинирование, фактурирование, нанесение гальванических покрытий и оксидных плёнок с целью придания им декоративного эффекта.

В данной работе будут рассмотрены такие виды обработки, как формирование фактурной поверхности и декоративных покрытий на поверхности сплавов серебра.

Фактурная поверхность может играть чрезвычайно важную роль в арт-дизайне. Проектировщик может создать ощущение натурализма или используемой фактурой, самостоятельно, добавить интересный декоративный эффект и тем самым визуальное воздействие на зрителя. Есть много способов создать разнообразные фактуры для визуализации, используя много различных материалов [3].

В современных ювелирных изделиях широко используется различное фактурирование металлических поверхностей с целью декорирования. Существует большое количество техник получения фактурной поверхности [4]. Одной из разновидностей является декоративное электрохимическое фактурирование (ЭХФ) поверхности различных металлов и сплавов, составляющее очень серьёзную конкуренцию другим методам формирования фактур за счёт высокой производительности, простоты и возможности обработки тонкостенных сложнопрофилированных поверхностей большой

площади [5-8]. Нами экспериментально доказана возможность формирования крупных высокодекоративных фактур с развитым рельефом на поверхности серебра 925 пробы при замене постоянного тока на импульсный [9, 10]. Импульсный ток позволяет стабильно поддерживать обрабатываемую поверхность на границе «пассивность – активность», т. е. начало областей пассивации и транспассивного растворения, что способствует осуществлению ЭХФ.

В ювелирной промышленности широко используются декоративные покрытия, придающие изделию различные визуальные эффекты. Одним из наиболее распространённых технологических приёмов является формирование анодных конверсионных плёнок на поверхности металла, так называемое декоративное электрохимическое анодирование (ЭХА) [11, 12]. Существует способ формирования цветных плёнок в электролите на основе тиосульфата натрия с ацетатом натрия и уксусной кислотой. Однако данный способ обладает рядом существенных недостатков: низкая механическая прочность плёнки и потемнение плёнки под воздействием среды, предположительно связанное с доокислением серы [13]. Нами экспериментально доказана возможность формирования плёнок на поверхности серебра 925 пробы при использовании импульсного тока [10].

В настоящей работе представлены результаты исследований анодного электрохимического формирования декоративных фактур и плёнок на поверхности сплава серебра 925 пробы с использованием униполярного и биполярного импульсных токов.

Методика проведения эксперимента

ЭХФ проводилось на поверхности плоских образцов из сплава серебра 925 пробы (Ag 92,5 %, Cu 6,5 %, Zn 1 %) в растворе тиосульфата натрия $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 800–820 г/л. Для приготовления электролита использовались химические реактивы марки «ч» и «хч» и дистиллированная вода.

Для проведения эксперимента собран стенд. Стенд состоит из приборов и оборудования, позволяющих реально моделировать процесс импульсной ЭХО, а также с высокой точностью регистрировать параметры обработки. Его блок-схема представлена на рис. 1. Стенд включает [14]:

- электрохимическую ячейку (ЭХЯ) и систему термостабилизации электролита;
- импульсный источник питания, генерирующий на ЭХЯ одиночные импульсы или непрерывную последовательность импульсов тока изменяемых амплитудно-временных параметров;
- систему перемешивания электролита;
- систему контроля и регистрации технологического тока.

ЭХЯ выполнена из винипласта, катоды – из нержавеющей стали 12Х18Н9Т. В систему термостабилизации электролита входят: нагревательное устройство «водяная рубашка», термометр.

Импульсы тока подавались от генератора импульсов прямоугольной формы с независимой регулировкой всех АВПИ в следующих пределах: длительность импульсов тока положительной полярности $t_{\text{имп}} = 100\text{--}900$ мкс; отрицательной полярности $t_{\text{отр.имп}} = 100\text{--}900$ мкс; амплитудная плотность тока в импульсе положительной полярности $i_{\text{имп}} = 0\text{--}10$ А/см² и отрицательной полярности $i_{\text{отр.имп}} = 0\text{--}10$ А/см² (режим униполярный при $i_{\text{отр.имп}} = 0$). Продолжительность обработки $\tau = 2\text{--}4$ мин [15].

В систему перемешивания электролита входят: механическая лопастная мешалка, которой придаётся вращение через ремённую передачу от двигателя постоянного тока; электродвигатель постоянного тока СЛ-661 с регулируемым числом оборотов.

В систему контроля и регистрации электрических параметров входят: специально сконструированный коаксиальный шунт для измерения амплитуды и формы импульсов, запоминающий осциллограф с памятью GRS-6052A, фиксирующий поляризационные и токовые зависимости от времени, и персональный компьютер (ПК) с необходимым программным обеспечением (ПО).

Микроструктурное травление проводилось в травителе следующего состава: вода дистиллированная H_2O 100 мл, оксид хрома CrO_3 0,2 г, несколько капель концентрированной серной кислоты H_2SO_4 . Продолжительность обработки 60 с [16].

Поверхность фотографировалась на микроскопе ММУ-3; её микрогеометрические параметры фиксировались на микроскопах МИС-11 и МИИ-4. После травления образцы фотографировались на ме-



Рис. 1. Блок-схема лабораторно-исследовательского стенда

Fig. 1. Flowchart of the investigative test bench

таллографическом микроскопе «МЕТАМ 32-ЛВ» с увеличением 1000. Полученные фотографии обрабатывались в программе SIAMS Photolab [9].

Блеск и матовость фактур определялись визуально. К крупноразмерным отнесены фактуры с показателем шероховатости поверхности $R_{z,cp} \geq 9$ мкм, к среднеразмерным $7 \leq R_{z,cp} < 9$ мкм, к мелко-размерным $R_{z,cp} < 7$ мкм.

Декоративность получаемых при ЭХА покрытий оценивалась по цвету (оттенку) плёнки, а также по её толщине $b_{пл}$ [мкм]. Технологичность формирования – по удельному электрохимическому (ЭХ) съёму металла $K_{съем}$ [г/см²]. Для определения удельного съёма металла образец подвергался взвешиванию на аналитических весах Vibra серии НТ до и после ЭХ-обработки.

Для измерения толщины защитно-декоративных покрытий пользуются винтовым окуляр-микроскопом МОВ-1-15 [17]. Не менее важной характеристикой покрытий является устойчивость к истиранию, которая определялась трением образца поочередно полировальной салфеткой Microfiber (устойчивые образцы выделены курсивом) и наждачной влагостойкой бумагой SIA P2000 (жирный шрифт). Давление, приложенное к образцам, имитируют условия эксплуатации ЮХИ.

Для определения цвета, его характеристик использовались следующие программы: *ColorPicker Eyedropper*, *ColorHexa – Color Information and Conversion*. Принципом работы программы *ColorPicker Eyedropper* является обнаружение и фиксация цвета на изображении и его распознавание. Отсканированные изображения плёнок загружались в интернет-браузер, с помощью программы идентифицировался HEX-код цвета, который вводился в программу *ColorHexa – Color Information and Conversion*. Данная программа позволяет увидеть название этого цвета и его обозначение в цветовых координатах RGB.

Результаты экспериментов по ЭХФ и их обсуждение

ЭХФ проводится при режимах и в электролите, обеспечивающих на обрабатываемой поверхности протекание конкурирующих процессов анодного растворения и образования пассивной плёнки, то есть поддержание условий «активность – пассивность», которые наблюдаются в начале области пассивации CD и в начале области транспассивного растворения EF (рис. 2).

Это подтверждают следующие экспериментальные факты:

- обязательное образование пассивной плёнки на обрабатываемой поверхности;
- влияние гидродинамики (перемешивания электролита или покачивания обрабатываемых образцов) на процесс фактурирования.

Формирование таких условий лучше всего обеспечивается при использовании импульсных токов и электролитов, предназначенных для электрохимического полирования [18].

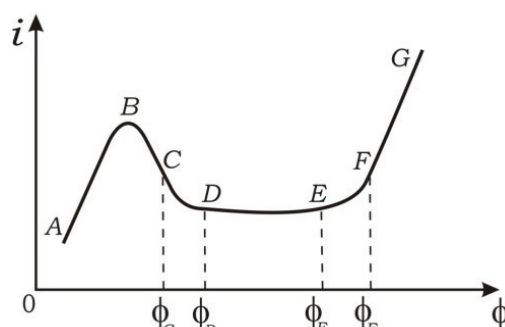


Рис. 2. Анодная поляризационная кривая: i – плотность тока, ϕ – анодный потенциал

Fig. 2. Anode polarization curve: i is the current density, ϕ is the electronegative potential

При исследованиях отмечены следующие экспериментальные зависимости и особенности:

1. На первых двух минутах обработки интенсивность образования пассивирующей плёнки тёмно-серого или чёрного цвета незначительна, затем она нарастает. На 4–5 минутах обработки плёнка начинает разрушаться и отслаиваться с поверхности. Чем интенсивнее образование плёнки, тем выше пассивация поверхности и тем, естественно, меньше плотность тока в импульсе. При этом на первых двух минутах обработки формируются мелкие или средние по размеру матовые фактуры; на 3–4 минутах – средние, часто покрытые устойчивой, плохо удаляемой с поверхности плёнкой (под которой находится среднефактурированная поверхность, образовавшаяся на первых двух минутах); после пяти минут – крупноразмерные и блестящие. Таким образом, для образования фактур плёнка должна лишь частично пассивировать поверхность и не сильно препятствовать протеканию параллельного процесса анодного растворения.
2. В общем случае слабое перемешивание электролита приводит к оттягиванию во времени начала пассивации анодной поверхности, замедлению процесса плёнокообразования, но полностью изменить тенденцию образования плёнки на всей поверхности при увеличении длительности обработки не может. Влияние перемешивания на разрушение плёнки при увеличении продолжительности обработки незначительно. Скорее всего, разрушение связано с изменением структуры плёнки из-за доокисления составляющих её соединений.
3. Увеличение количества электричества в отрицательном импульсе тока приводит к разрушению пассивной плёнки на поверхности образца. Вследствие активации поверхности происходит возрастание тока в анодном (положительном) импульсе. Действие отрицательного импульса во многом аналогично влиянию перемешивания электролита на процесс плёнокообразования, поэтому при использовании биполярных импульсов перемешивание можно не использовать.

- Фактурированная поверхность приобретает блеск при увеличении продолжительности обработки и переходе процесса в область транспассивного растворения при разрушении плёнки и соответствующем увеличении величины шероховатости. Мелко- и среднефактурные поверхности, сформированные при непродолжительном электролизе, матовые. При прочих равных условиях при использовании биполярных импульсов фактуры начинают блестеть при меньшей величине шероховатости.
- Крупные фактуры формируются предпочтительно при использовании униполярных импульсов тока, образовании достаточно устойчивой плёнки на обрабатываемой поверхности и при слабом перемешивании электролита (рис. 3). Применение биполярных импульсов тока снижает интенсивность образования плёнки и приводит к уменьшению размера формируемых фактур (рис. 4).
- Увеличение шероховатости поверхности в процессе фактурообразования при увеличении продолжительности обработки неизбежно приводит к возрастанию эффективной площади анодной поверхности и росту силы тока, необходимого для продолжения процесса ЭХФ.
- Форма импульса тока отражает процессы на анодной поверхности. При использовании относительно длительных униполярных импульсов (500 мкс) небольшой пик в их начале с дальнейшим спадом свидетельствует о плёнокообразовании (рис. 5, а). Возрастание амплитуды импульса к его окончанию отражает превалирование процесса анодного растворения над плёнокообразованием (рис. 5, б).

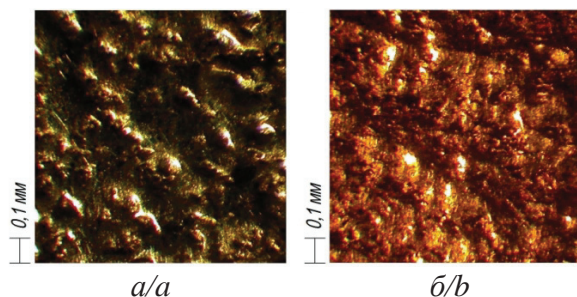


Рис. 3. Крупнофактурные блестящие поверхности, сформированные при использовании униполярных импульсов тока при слабом перемешивании электролита: а) $R_{z\text{cp}}=10,5$ мкм, $\tau=4$ мин, $i_{a\text{имп}}=5$ А/см², $t_{\text{имп}}=100$ мкс; б) $R_{z\text{cp}}=11,2$ мкм, $\tau=5$ мин, $i_{a\text{имп}}=4,3$ А/см², $t_{\text{имп}}=500$ мкс

Fig. 3. Big decorative invoicing bright surfaces formed by unipolar current pulses with weak mixing of electrolyte: а) $R_{z\text{av}}=10,5$ microns, $t=4$ min, $i_{\text{pulse}}=5$ A/cm², $t_{\text{pulse}}=100$ m-s; б) $R_{z\text{av}}=11,2$ microns, $t=5$ min, $i_{\text{pulse}}=4,3$ A/cm², $t_{\text{pulse}}=500$ m-s

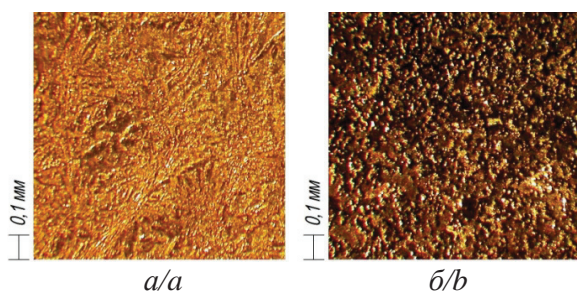


Рис. 4. Среднефактурные блестящие поверхности, сформированные при использовании биполярных импульсов тока: а) $R_{z\text{cp}}=8,2$ мкм, $\tau=4$ мин, $i_{a\text{имп}}=2,3$ А/см², $t_{\text{имп}}=500$ мкс, $i_{a\text{отр.имп}}=2,2$ А/см², $t_{\text{отр.имп}}=600$ мкс; б) $R_{z\text{cp}}=6$ мкм, $\tau=4$ мин, $i_{a\text{имп}}=1,7$ А/см², $t_{\text{имп}}=500$ мкс, $i_{a\text{отр.имп}}=2,4$ А/см², $t_{\text{отр.имп}}=400$ мкс

Fig. 4. Average decorative invoicing bright surfaces formed by bipolar current pulses: а) $R_{z\text{av}}=8,2$ microns, $\tau=4$ min, $i_{\text{pulse}}=2,3$ A/cm², $t_{\text{pulse}}=500$ m-s, $i_{\text{rev}}=2,2$ A/cm², $t_{\text{rev}}=600$ m-s; б) $R_{z\text{av}}=6$ microns, $\tau=4$ min, $i_{\text{pulse}}=1,7$ A/cm², $t_{\text{pulse}}=500$ m-s, $i_{\text{rev}}=2,4$ A/cm², $t_{\text{rev}}=400$ m-s

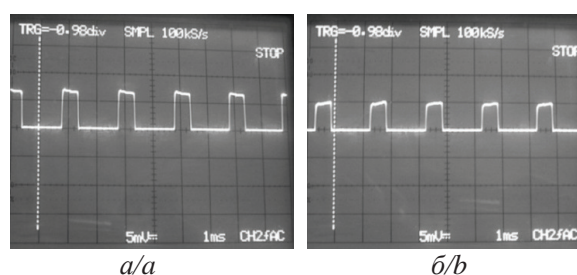


Рис. 5. Осциллограммы униполярных импульсов тока при процессе ЭХФ с перемешиванием электролита: а) $R_{z\text{cp}}=4,2$ мкм, $\tau=1$ мин, $i_{a\text{имп}}=4,3$ А/см², $t_{\text{имп}}=500$ мкс, поверхность матовая; б) $R_{z\text{cp}}=9,5$ мкм, $\tau=4$ мин, $i_{a\text{имп}}=2,8$ А/см², $t_{\text{имп}}=500$ мкс, поверхность блестящая

Fig. 5. Oscillograms of unipolar current pulses at ECI with electrolyte mixing: а) $R_{z\text{av}}=4,2$ microns, $\tau=1$ min, $i_{\text{pulse}}=4,3$ A/cm², $t_{\text{pulse}}=500$ m-s, mat surface; б) $R_{z\text{av}}=9,5$ microns, $\tau=4$ min, $i_{\text{pulse}}=2,8$ A/cm², $t_{\text{pulse}}=500$ m-s, bright surface

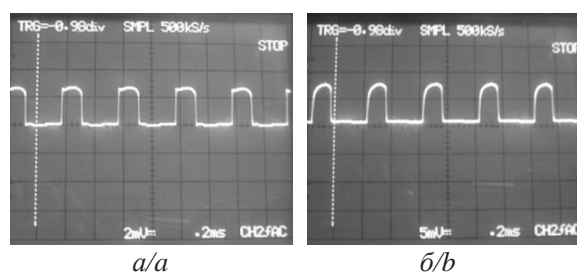


Рис. 6. Осциллограммы униполярных импульсов тока при процессе ЭХФ: а) $R_{z\text{cp}}=8,7$ мкм, $\tau=3$ мин, $i_{a\text{имп}}=1,8$ А/см², $t_{\text{имп}}=100$ мкс, без перемешивания электролита, поверхность матовая; б) $R_{z\text{cp}}=10,5$ мкм, $\tau=4$ мин, $i_{a\text{имп}}=4,7$ А/см², $t_{\text{имп}}=100$ мкс, перемешивание электролита, поверхность блестящая

Fig. 6. Oscillograms of unipolar current pulses at the ECI: а) $R_{z\text{av}}=8,7$ microns, $\tau=3$ min, $i_{\text{pulse}}=1,8$ A/cm², $t_{\text{pulse}}=100$ m-s, without electrolyte mixing, mat surface; б) $R_{z\text{av}}=10,5$ microns, $\tau=4$ min, $i_{\text{pulse}}=4,7$ A/cm², $t_{\text{pulse}}=100$ m-s, with electrolyte mixing, bright surface

- При использовании коротких униполярных импульсов тока (100 мкс) и интенсивном образовании плёнки в начале импульса формируется небольшой пик (рис. 6, а). При замедлении плёнокообразования крыша импульса приобре-

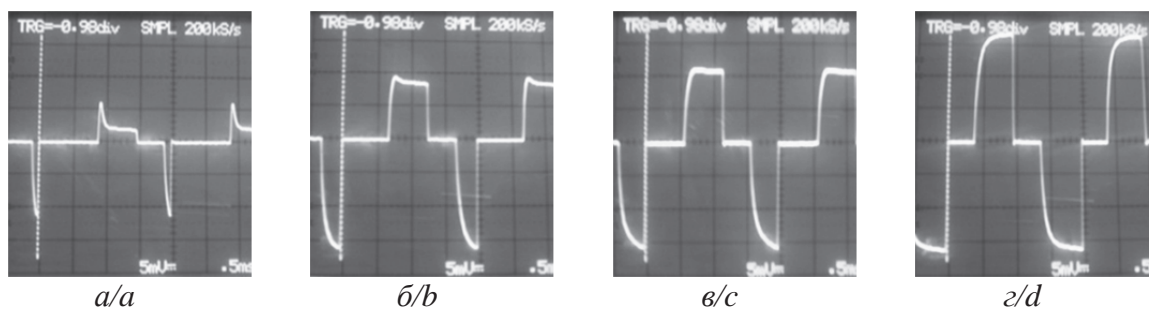


Рис. 7. Осциллограммы биполярных импульсов тока при процессе ЭХФ без перемешивания электролита: а) $R_{z\text{cp}}=3,3$ мкм, $\tau=1$ мин, $i_{a\text{имп}}=0,9$ А/см², $t_{\text{имп}}=500$ мкс, $i_{a\text{отр.имп}}=1,5$ А/см², $t_{\text{отр.имп}}=100$ мкс, поверхность матовая; б) $R_{z\text{cp}}=4,4$ мкм, $\tau=1$ мин, $i_{a\text{имп}}=1,5$ А/см², $t_{\text{имп}}=500$ мкс, $i_{a\text{отр.имп}}=2,2$ А/см², $t_{\text{отр.имп}}=300$ мкс, поверхность матовая; в) $R_{z\text{cp}}=3,6$ мкм, $\tau=1$ мин, $i_{a\text{имп}}=1,7$ А/см², $t_{\text{имп}}=500$ мкс, $i_{a\text{отр.имп}}=2,2$ А/см², $t_{\text{отр.имп}}=400$ мкс, поверхность матовая; г) $R_{z\text{cp}}=8,2$ мкм, $\tau=4$ мин, $i_{a\text{имп}}=2,3$ А/см², $t_{\text{имп}}=500$ мкс, $i_{a\text{отр.имп}}=2,2$ А/см², $t_{\text{отр.имп}}=600$ мкс, поверхность блестящая

Fig. 7. Oscillograms of bipolar current pulses at the ECI without electrolyte mixing: а) $R_{z\text{av}}=3,3$ microns, $\tau=1$ min, $i_{\text{pulse}}=0,9$ А/см², $t_{\text{pulse}}=500$ m-s, $i_{\text{rev}}=1,5$ А/см², $t_{\text{rev}}=100$ m-s, mat surfaces; б) $R_{z\text{av}}=4,4$ microns, $\tau=1$ min, $i_{\text{pulse}}=1,5$ А/см², $t_{\text{pulse}}=500$ m-s, $i_{\text{rev}}=2,2$ А/см², $t_{\text{rev}}=300$ m-s, mat surfaces; в) $R_{z\text{av}}=3,6$ microns, $\tau=1$ min, $i_{\text{pulse}}=1,7$ А/см², $t_{\text{pulse}}=500$ m-s, $i_{\text{rev}}=2,2$ А/см², $t_{\text{rev}}=400$ m-s, mat surfaces; д) $R_{z\text{av}}=8,2$ microns, $\tau=4$ min, $i_{\text{pulse}}=2,3$ А/см², $t_{\text{pulse}}=500$ m-s, $i_{\text{rev}}=2,2$ А/см², $t_{\text{rev}}=600$ m-s, bright surfaces

тает колоколообразную форму с более пологим передним фронтом (рис. 6, б). При этом образующаяся плёнка не препятствует анодному растворению за счёт своей неоднородности.

9. При использовании биполярных импульсов тока протекающие на поверхности процессы ярче отражаются на форме импульсов. Выраженный пик в начале импульса свидетельствует об активном плёнокообразовании (рис. 7, а). Чем он меньше, тем слабее образующаяся плёнка экранирует анодную поверхность к окончанию импульса (рис. 7, б, в). При его отсутствии влияние плёнки совсем незначительно (рис. 7, г).

Влияние конкурирующих процессов плёнокообразования и анодного растворения на форму импульсов тока рассматривалось ранее в работах по исследованию электрохимического полирования (ЭХП) поверхности серебра [19, 20], а также золота [14]. Несомненным является близость процессов на поверхности анодно обрабатываемых металлов в течение ЭХП и ЭХФ. По форме импульсов и при ЭХП и при ЭХФ можно определять протекание тех

или иных явлений или процессов на анодной поверхности и прогнозировать результат обработки.

Изучен состав плёнки, формируемой на аноде в процессе ЭХФ. Исследованы образцы с легко удаляемой плёнкой, образцы с удалённой плёнкой, а также отдельно сама плёнка. Данные получены на рентгеновском экваториальном дифрактометре ДРОН УМ-1 с приставкой для поликристаллических образцов. Настройки дифрактометра: кобальтовое излучение λCoK_α ; β -фильтр; $U=35$ кВ; $I=12$ мА; $\theta-2\theta$ сканирование; щели Соллера с углом расходимости 2° ; щель перед детектором – 0,5 мм; скорость перемещения детектора – 0,5 град/мин; постоянная интегрирующей RC-цепи – 2 с; скорость счёта импульсов – $3 \cdot 10^3$ с⁻¹; вращение образца. Дифрактограмма образца, с которого удалили плёнку, показывает наличие двух ярко выраженных фаз – Ag_2S и Ag (рис. 8).

На покрытых плёнкой образцах интенсивность пиков этих фаз значительно уменьшается, что говорит о большой поглощательной способности плёнки. Поэтому можно предположить, что плён-

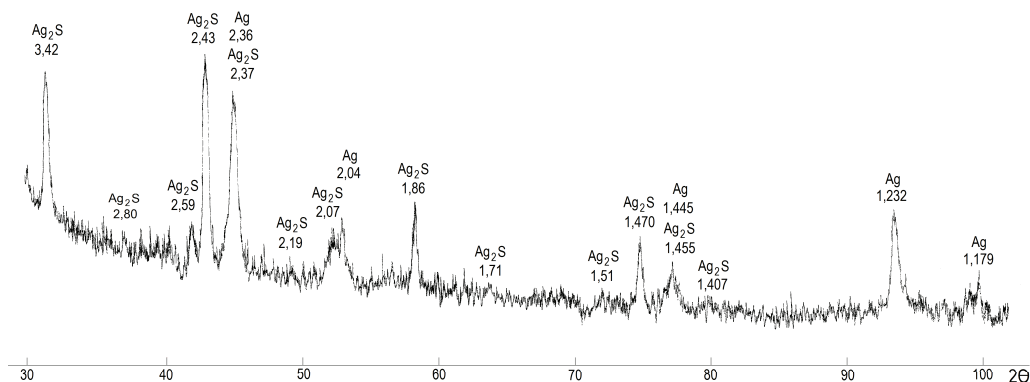


Рис. 8. Дифрактограмма образца с удалённой плёнкой

Fig. 8. Diffraction pattern of a sample with a remote film

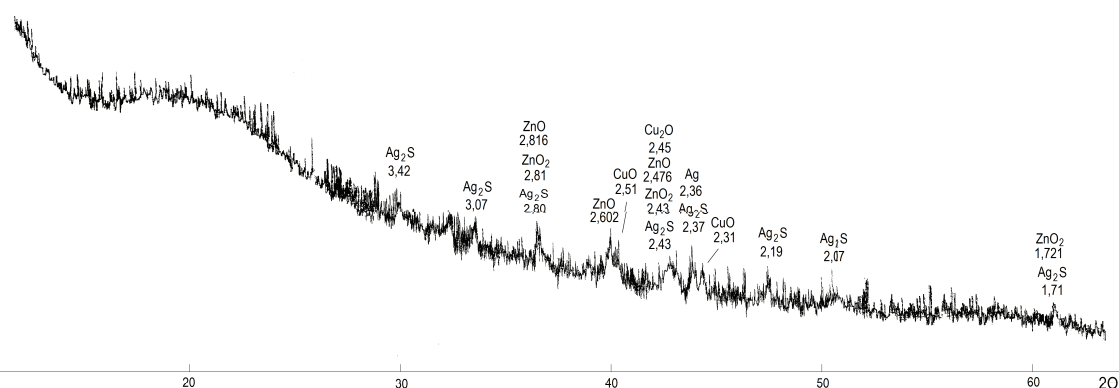


Рис. 9. Дифрактограмма плёнки образца

Fig. 9. Diffraction pattern of a film from a sample

ка образована не только из сульфидных соединений, но и имеет в своем составе тяжелые атомы.

Дифрактограмма отдельно снятой плёнки образца (рис. 9) даёт под малыми углами (17° – 25°) протяжённый аморфный пик, характеризующий ближний порядок в расположении атомов. Соответствующие ему межатомные расстояния лежат в интервале от 6,1 до 4,1 Å, среднее значение – 5,1 Å. Дифракционные пики, характеризующие кристаллические фазы, имеют малую интенсивность. Вычисленные межплоскостные расстояния свидетельствуют о наличии в плёнке кристаллических фаз Ag_2S , ZnO и ZnO_2 , CuO и Cu_2O .

Рентгеноструктурное определение размеров кристаллитов (зёрен) плёнки проведено по формуле Шеррера-Селякова из анализа уширения экспериментальных линий [21]:

$$L = \frac{\lambda}{\beta \cos \Theta}.$$

Физическое уширение β , вызванное малыми размерами кристаллитов и микронапряжениями, определялось как разность экспериментальной ширины пика и инструментальной ширины b , зависящей от геометрии съёмки, расходимости пучка, размера фокуса трубки и т. д. Инструментальная ширина определялась с помощью монокристалла кремния для отражения (111) ($2\theta=33,15^{\circ}$) и составила $0,16^{\circ}$. Как показано на рис. 9, экспериментальная ширина для второго пика Ag_2S при $d_n=3,07$ Å ($2\theta=33,91^{\circ}$) составила $0,25^{\circ}$. Расчёт даёт среднее значение размеров кристаллитов – 1190 Å.

Результаты экспериментов по ЭХА и их обсуждение

ЭХА, как и ЭХФ, проводятся на режимах и в электролитах, обеспечивающих поддержание условий «активность – пассивность», которые наблюдаются либо в начале области пассивации, либо в начале области транспассивного растворения. В табл. 1 и 2 приведены наиболее интересные с точки зрения декоративности и технологичности формирования результаты ЭХА поверхности при различных АВП импульсного тока при $t=20$ – 40°C .

Похожие режимы по плотности тока использовались при обработке на постоянном токе, но исследования показали, что в этом случае формируемые плёнки не отличаются разнообразием оттенков цвета. Тем не менее на поверхности образуется прозрачная плёнка, достаточно устойчивая к механическим воздействиям.

Экспериментальные результаты свидетельствуют, что использование импульсного тока, по сравнению с постоянным, обеспечивает получение более декоративно выразительных плёнок на поверхности сплава серебра 925 пробы в экологически безвредном незначительно подогретом тиосульфатном электролите при изменении АВП импульсов и продолжительной обработке.

При использовании униполярных импульсов тока формируются плёнки только серой гаммы от более светлых к более тёмным тонам в зависимости от толщины формируемой плёнки. Использование биполярных импульсов позволяет расширить их цветовую гамму в тёмной области оттенков. В данном случае отсутствует зависимость оттенка цвета

Таблица 1. Режимы ЭХА поверхности импульсным униполярным током

Table 1. Modes of surface ECA by unipolar pulse current

| Режим Mode | $t_{\text{имп}}$, мкс t_{pulse} , m·s | q | $\tau_{\text{обр}}$, мин τ , min | $t_{\text{обр}}$, °C | $i_{\text{имп}}$, А/см ² i_{pulse} , A/cm ² | $K_{\text{съёмка}}$, г/см ² K_{removal} , g/cm ² | $b_{\text{пл}}$, мкм b_{film} , micron | RGB |
|---------------|--|----------|---|-----------------------|--|---|---|-------------------|
| 1 | 1000 | 4 | 3 | 35 | 0,6 | 0,0031 | 1,02 | 45, 45, 45 |
| 2 | 1000 | 4 | 4 | 35 | 0,6 | 0,0036 | 1,22 | 37, 37, 37 |
| 3 | 500 | 4 | 5 | 35 | 0,08 | 0,0096 | 1,53 | 29, 29, 29 |
| 4 | 1000 | 2 | 3 | 35 | 0,3 | 0,0037 | 2,41 | 21, 21, 21 |
| 5 | 10000 | 2 | 3 | 35 | 0,3 | 0,0030 | 1,36 | 18, 18, 18 |

Таблица 2. Режимы ЭХА поверхности импульсным биполярным током

Table 2. Modes of surface ECA by bipolar pulse current

| Режим Mode | $t_{\text{имп}}, \text{МКС}$ $t_{\text{pulse}}, \text{m}\cdot\text{s}$ | q | $\tau_{\text{обр}}, \text{МИН}$ τ, min | $t_{\text{обр}}, \text{°C}$ | $i_{\text{а имп}}, \text{А/CM}^2$ $i_{\text{pulse}}, \text{A/cm}^2$ | $i_{\text{а обр имп}}, \text{А/CM}^2$ $i_{\text{rev}}, \text{A/cm}^2$ | $K_{\text{съёма}}, \text{Г/CM}^2$ $K_{\text{removal}}, \text{g/cm}^2$ | $b_{\text{пл}}, \text{МКМ}$ $b_{\text{film}}, \text{micron}$ | RGB |
|---------------|---|------------|---|-----------------------------|--|--|--|---|-------------------|
| 1 | 10000 | 1,5 | 5 | 35 | 0,05 | 0,05 | 0,0014 | 0,97 | 47, 49, 48 |
| 2 | 100 | 4 | 4 | 25 | 0,05 | 0,02 | 0,0052 | 1,17 | 52, 56, 57 |
| 3 | 100 | 4 | 4 | 35 | 0,8 | 0,2 | 0,0055 | 1,32 | 44, 39, 45 |
| 4 | 100 | 4 | 5 | 35 | 0,8 | 0,2 | 0,0051 | 1,48 | 38, 38, 38 |
| 5 | 100 | 4 | 2 | 40 | 0,74 | 0,91 | 0,0055 | 2,41 | 38, 34, 35 |
| 6 | 500 | 4 | 4 | 35 | 0,33 | 0,05 | 0,0047 | 1,25 | 34, 34, 36 |
| 7 | 500 | 4 | 2 | 40 | 0,12 | 0,01 | 0,0043 | 1,14 | 48, 55, 48 |
| 8 | 500 | 4 | 3 | 40 | 0,12 | 0,01 | 0,0054 | 1,19 | 40, 40, 40 |
| 9 | 1000 | 1,5 | 4 | 35 | 0,12 | 0,02 | 0,0041 | 1,05 | 41, 46, 42 |
| 10 | 10000 | 1,5 | 4 | 35 | 0,05 | 0,01 | 0,0029 | 2,56 | 39, 38, 33 |

от толщины плёнки. Цветовая гамма, получаемая при использовании импульсного тока, представлена в табл. 3.

ЭХА проводится на режимах и в электролитах, обеспечивающих на обрабатываемой поверхности протекание конкурирующих процессов анодного

Таблица 3. Цветовая гамма плёнок при ЭХА импульсным униполярным током

Table 3. Films gamma at ECA by unipolar pulse current

| Импульсный униполярный ток/Unipolar pulse current | | | | |
|--|---|---------------------------------------|--|--|
| | | | | |
| RGB (45,45,45) | RGB (37,37,37) | RGB (29,29,29) | RGB (21,21,21) | RGB (18,18,18) |
| Чернографитный (почти чёрный) / Very dark gray (mostly black) | | | | |
| Импульсный биполярный ток/Bipolar pulse current | | | | |
| | | | | |
| RGB (47,49,48) | RGB (52,56,57) | RGB (44,39,45) | RGB (38,38,38) | RGB (38,34,35) |
| Тёмный голубовато-желтовато-зелёный Very dark cyan-lime green | Тёмный серовато-голубой Very dark grayish cyan | Тёмный пурпурный Very dark magenta | Серографитный Very dark gray | Чёрно-красный Very dark red |
| | | | | |
| RGB (34,34,36) | RGB (48,55,48) | RGB (40,40,40) | RGB (41,46,42) | RGB (39,38,33) |
| Тёмный голубой Very dark blue | Тёмный серовато-лимонно-зелёный Very dark grayish lime green | Сигнальный чёрный Very dark cyan | Тёмный желтовато-зелёный Very dark lime green | Коричнево-оливковый Very dark olive |

растворения и образования пассивной плёнки, с превалированием второго процесса.

При исследованиях отмечены следующие экспериментальные зависимости и особенности:

1. С первых минут обработки на поверхности образца начинается формирование оксидно-солевой плёнки. С увеличением продолжительности обработки растут толщина плёнки и её устойчивость к истиранию, а также и съём металла. На рис. 10 и 11 представлены, соответственно, изменения удельного ЭХ съёма металла $K_{\text{съем}}$ и толщины плёнки $b_{\text{пл}}$ с ростом продолжительности обработки τ в результате ЭХА импульсными токами при температуре 35 °С. Оптимальная продолжительность ЭХА составляет 4–5 мин, что связано с резким ростом удельного ЭХ съёма к 6 минуте.

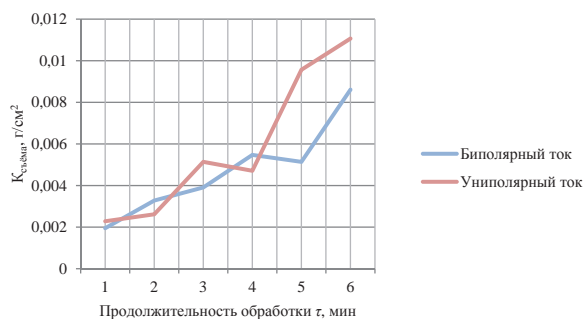


Рис. 10. Изменение показателя удельного ЭХ растворения металла при ЭХА

Fig. 10. Change of specific EC indicator of metal dissolution at ECA

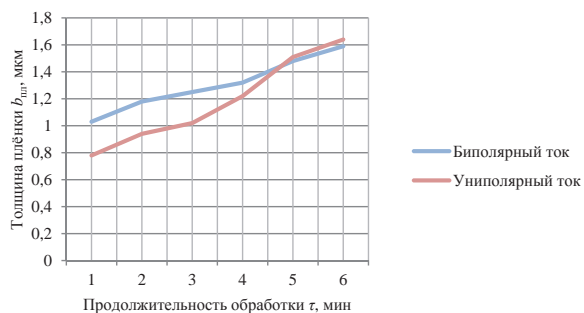


Рис. 11. Изменение толщины плёнки при ЭХА

Fig. 11. Change of film thickness at ECA

2. Оптимальная температура электролита для ЭХА составляет 35 °С. Понижение температуры приводит к образованию дефектов плёнки (неоднородность, трещины) вследствие низкой её адгезии к поверхности образца и в конечном итоге к понижению устойчивости к механическим воздействиям. Повышение температуры приводит к росту съёма драгоценного металла, что также является отрицательным фактором в условиях промышленного использования ЭХА.
3. Однотонные плёнки формируются предпочтительно при использовании униполярных им-

пульсов тока с образованием достаточно устойчивой плёнки на обрабатываемой поверхности. Применение обратных импульсов тока позволяет получать более широкую гамму оттенков цвета плёнок.

4. Параллельно с плёнокообразованием протекает процесс фактурирования поверхности, что позволяет получать более интересный декоративный эффект после обработки.
5. Форма импульса тока отражает процессы, происходящие на анодной поверхности. При использовании униполярных импульсов небольшой пик в начале импульса с дальнейшим спадом свидетельствует о плёнокообразовании (рис. 12, а). Выравнивание амплитуды импульса к его окончанию отражает конкурирующее протекание процесса анодного растворения с процессом плёнокообразования (рис. 12, б).

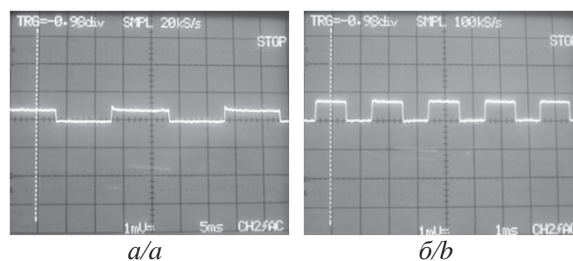


Рис. 12. Осциллограммы униполярных импульсов тока при ЭХА: а) $\tau=3$ мин, $i_{\text{имп}}=0,03$ А/см², $t_{\text{имп}}=1000$ мкс, $q=2$; б) $\tau=5$ мин, $i_{\text{имп}}=0,05$ А/см², $t_{\text{имп}}=1000$ мкс, $q=2$

Fig. 12. Oscillograms of unipolar current pulses at ECA: а) $\tau=3$ min, $i_{\text{pulse}}=0,03$ А/cm², $t_{\text{pulse}}=1000$ m·s, $q=2$; б) $\tau=5$ min, $i_{\text{pulse}}=0,05$ А/cm², $t_{\text{pulse}}=1000$ m·s, $q=2$

6. При использовании биполярных импульсов тока протекающие на поверхности процессы ярче отражаются на форме импульсов. Выраженный пик в начале импульса свидетельствует об активном плёнокообразовании (рис. 13).

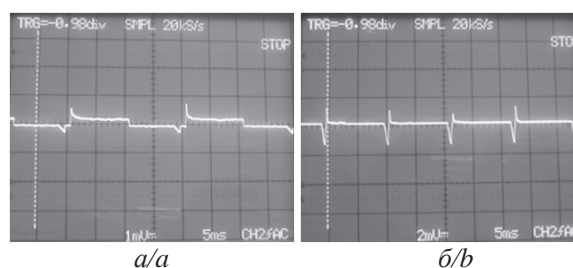


Рис. 13. Осциллограммы биполярных импульсов тока при ЭХА: а) $\tau=4$ мин, $i_{\text{имп}}=0,05$ А/см², $t_{\text{имп}}=1000$ мкс, $i_{\text{а имп.обр}}=0,02$ А/см², $t_{\text{имп.обр}}=100$ мкс, $q=2$; б) $\tau=5$ мин, $i_{\text{имп}}=0,05$ А/см², $t_{\text{имп}}=10000$ мкс, $i_{\text{а имп.обр}}=0,05$ А/см², $t_{\text{имп.обр}}=600$ мкс, $q=1,5$

Fig. 13. Oscillograms of bipolar current pulses at ECA: а) $\tau=4$ min, $i_{\text{pulse}}=0,05$ А/cm², $t_{\text{pulse}}=1000$ ms, $i_{\text{rev}}=0,02$ А/cm², $t_{\text{rev}}=100$ ms, $q=2$; б) $\tau=5$ min, $i_{\text{pulse}}=0,05$ А/cm², $t_{\text{pulse}}=10000$ ms, $i_{\text{rev}}=0,05$ А/cm², $t_{\text{rev}}=600$ μs, $q=1,5$

Выводы и рекомендации

В общем виде процесс электрохимического фактурирования представляется следующим образом:

1. ЭХФ возможно при наличии параллельно протекающих процессов анодного растворения и образования пассивной плёнки на обрабатываемой поверхности. От соотношения скоростей этих процессов и свойств образующейся плёнки существенно зависят свойства формируемых фактур.
2. Для получения фактуры с высокими декоративными свойствами необходима мелкозернистая структура сплава. Когда же размеры зёрен соизмеримы с характерными неровностями фактуры, то преимущественное травление и фазообразование на межзёрненных границах и определённых кристаллографических плоскостях отрицательно влияют на фактурообразование.
3. Несомненным является близость процессов на поверхности анодно обрабатываемых металлов в течение ЭХП и ЭХФ. Оба процесса проходят при параллельном протекании двух процессов: анодного растворения и формирования на поверхности анода и в прианодных областях электролита препятствующих ему фаз. По форме импульсов можно прогнозировать результат обработки.
4. Для формирования ярко выраженных блестящих фактур необходимо создавать условия транспассивного растворения на анодной поверхности, что эффективнее осуществлять при использовании униполярных импульсов тока. Для формирования матовых высокодекоративных фактур и фактур с шелковистым декоративным блеском лучше использовать биполярные импульсы тока.
5. Продолжительность процесса ЭХФ определяет свойства плёнки и в конечном итоге вид формируемых фактур. Плёнки имеют кристалличе-

скую и аморфную составляющие. В него входят оксиды и сернистые соединения металлов, присутствующих в сплаве, – серебра, меди и цинка. Можно предположить возможности доокисления компонентов плёнки в процессе обработки, изменения её структуры, что приводит к снижению её устойчивости и способствует переходу анодной поверхности из зоны пассивации в зону транспассивного растворения.

В общем виде процесс электрохимического анодирования представляется следующим образом:

1. Формирование плёнки происходит в области потенциалов, когда процесс ЭХО находится в состоянии пассивации.
2. Однотонные плёнки формируются предпочтительно при использовании униполярных импульсов тока с образованием достаточно устойчивой плёнки на обрабатываемой поверхности. Применение обратных импульсов тока позволяет получать более широкую гамму оттенков цвета плёнок.
3. Одновременно с процессом формирования плёнки на поверхности образца формируется мелко- и среднеразмерная фактура. Постепенно процесс плёнокообразования превалирует над процессом фактурообразования, вследствие чего формируемая плёнка покрывает ранее сформированную фактуру. В итоге фактурообразование прекращается и возрастает только показатель толщины плёнки. При этом происходит изменение цветовой гаммы плёнок в сторону увеличения насыщенности оттенков.
4. ЭХА имеет ряд преимуществ перед другими способами декорирования поверхности, так как позволяет формировать устойчивые плёнки широкой цветовой гаммы в области тёмных оттенков на параллельно создаваемой мелкофактурной поверхности. Совмещение этих двух процессов усиливает декоративность получаемых конверсионных покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермаков М.П. Основы дизайна. Художественная обработка металла. – М.: ЛитераФорте, 2014. – 460 с.
2. Воронов Н.В. Суть дизайна. 56 тезисов русской версии понимания дизайна. – М.: Грант, 2002. – 280 с.
3. Knott J. Creating textured surfaces // *The painter's journal*. – Spring, 2005. – P. 1–6.
4. McGrath J. *The complete jewelry making course*. – L.: Quarto Publ., 2007. – 145 p.
5. Bard A.J., Faulkner L.R. *Electrochemical methods: fundamentals and applications*. – New York: John Wiley & Sons Inc., 2001. – 833 p.
6. McGrath J. *The Jeweler's Directory of Decorative Finishes: from Enameling and Engraving to Anodising and Mokume Gane*. – L.: Bloomsbury Publ., 2005. – 128 p.
7. Fassenda V. *Handbook on finishing*. – L.: WGC, 1999. – 68 p.
8. Лебедева Т.В. Совершенствование дизайна изделий из меди и медных сплавов с использованием импульсной электрохими-

ческой обработки поверхности: дис. ... канд. техн. наук. – Кострома: КГТУ, 2002. – 105 с.

9. Galanin S.I., Viskovaty I.S. Electrochemical surface texturing of silver // *Surf. Eng. Appl. Elect.* – 2015. – V. 51. – № 4. – P. 332–338.
10. Галанин С.И., Висковатый И.С., Безденежных А.Г. Декоративное электрохимическое фактурирование поверхности серебра 925 пробы // *Дизайн. Теория и практика*. – 2015. – № 19. – С. 73–81.
11. Грилихес С.Я., Тихонов К.И. *Электролитические и химические покрытия. Теория и практика*. – Л.: Химия, 1990. – 268 с.
12. Способ формирования на ювелирном изделии декоративной поверхности (варианты) и ювелирное изделие, полученное этим способом / М.Л. Вознесенский: пат. Российская Федерация № 2390424; заявл. 31.10.2008; опубл. 27.05.2010, Бюл. № 15. – 8 с.
13. Галанин С.И., Иванова О.А. Электрохимическое формирование декоративных цветных плёнок на поверхности сплава се-

- ребра SrM925 при использовании импульсных токов // Сборник научных трудов молодых учёных КГТУ. – Кострома: Изд-во Костромск. госуд. технол. ун-та, 2003. – С. 203–205.
14. Калинин И.В. Повышение качества поверхности сплавов золота 585 пробы электрохимическим полированием биполярными импульсами тока: дис. ... канд. техн. наук. – Кострома: КГТУ, 2010. – 137 с.
 15. Способ декоративного электрохимического фактурирования поверхности серебра / С.И. Галанин, И.С. Висковатый: пат. Российская Федерация № 2569876; заявл. 24.07.2014; опубл. 27.11.2015, Бюл. № 33. – 2 с.
 16. Беккерт М., Клемм Х. Справочник по металлографическому травлению. – М.: Металлургия, 1979. – 336 с.
 17. Лебедева Т.В. Измерение толщины защитно-декоративных покрытий. – Кострома: Изд-во Костромск. госуд. технол. ун-та, 2005. – 10 с.
 18. Галанин С.И., Гришина Е.П. Иванова О.А. Закономерности пленкообразования при электрохимическом полировании серебра и его сплавов с медью в тиосульфатных растворах // Журнал прикладной химии. – 2004. – Т. 77. – № 8. – С. 1299–1302.
 19. Никулин В.Н., Цыпин М.З. Электролитическая полировка серебра в растворах тиосульфата натрия // Журнал прикладной химии. – 1960. – Т. 39. – № 2. – С. 469–471.
 20. Иванова О.А. Осциллографическое исследование процесса ЭХП серебра и его сплавов SrM92,5 и SrM75,0 импульсным током в тиосульфатном электролите // Вестник Костромск. госуд. технол. ун-та. – 2004. – № 9. – С. 69–71.
 21. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. – М.: МИСИС, 1994. – 256 с.

Поступила 18.01.2016 г.

Информация об авторах

Галанин С.И., доктор технических наук, профессор кафедры технологии художественной обработки материалов, художественного проектирования, искусств и технического сервиса Костромского государственного технологического университета.

Висковатый И.С., аспирант кафедры технологии художественной обработки материалов, художественного проектирования, искусств и технического сервиса Костромского государственного технологического университета.

UDC 669.226.9

FEATURES OF SILVER SURFACE ELECTROCHEMICAL DECORATING

Sergey I. Galanin¹,
sgalanin@mail.ru

Ivan S. Viskovaty¹,
fenikus19@rambler.ru

¹ Kostroma State Technological University,
17a, Dzerzhinsky Street, Kostroma, 156005, Russia.

The relevance of the discussed issue is caused by the need to improve the methods the decorative processing of silver and its alloys. New phases are formed on anode surface (job) in the vast majority of the anode electrochemical processes, carried out to modify the properties of metal surfaces. Use of short current impulses (millisecond range duration) of a rectangular shape for anode processes allows affecting flexibly the course of phenomena at the interface «metal–electrolyte».

The main aim of the study is to form the decorative invoices and films on sterling silver surface in tiosulfate electrolyte by pulse currents; to study the processes occurring at the interface «metal–electrolyte» at anode electrochemical decorating of sterling silver.

The methods used in the study: modeling the pulse electrochemical treatment; photography of microgeometrical parameters with microscopes MIS-11 and MII-4; registration of amplitude-time parameters of impulses by oscillograph GRS-6052A; X-ray diffraction determination of film crystallites (grains) size by diffractometer DRON UM-1; photocolometry with software packages ColorPicker Eye-dropper, ColorHexa – Color Information and Conversion.

The results. The authors have studied the features of anode electrochemical decorating in tiosulfate electrolyte by unipolar and bipolar pulse currents. It was ascertained that electrochemical invoicing as well as electrochemical polishing take place at parallel passivation and activation of a surface. The authors revealed the dependence of processing result on the structure and microstructure of silver-copper alloy and studied the composition and structure of the generated anode film. The paper introduces the methods of formation of small, average and big size decorative invoices of a surface and decorative color oxide films, possessing high decorative properties, on the sterling silver surface.

Key words:

Electrochemical pulse processing, anode electrochemical processing, passivity, surface invoicing, oxide-coated films.

REFERENCES

- Ermakov M.P. *Osnovy dizayna. Khudozhestvennaya obrabotka metalla* [Design bases. Metal art processing]. Moscow, LiteraFor-te Publ., 2014. 460 p.
- Voronov N.V. *Sut dizayna. 56 tezisov russkoy versii ponimaniya dizayna* [Design essence. 56 notes for Russian design understanding]. Moscow, Grant Publ., 2002. 280 p.
- Knott J. Creating textured surfaces. *The painter's journal*, Spring 2005, pp. 1–6.
- McGrath J. *The complete jewelry making course*. London, Quarto Publ., 2007. 145 p.
- Bard A.J., Faulkner L.R. *Electrochemical methods: fundamentals and applications*. New York, John Wiley & Sons Inc, 2001. 833 p.
- McGrath J. *The Jeweler's Directory of Decorative Finishes: from Enameling and Engraving to Anodising and Mokume Gane*. London, Bloomsbury Publ., 2005. 128 p.
- Faccenda V. *Handbook on finishing*. London, WGC, 1999. 68 p.
- Lebedeva T.V. *Sovershenstvovanie dizayna izdeliy iz medi i mednykh splavov s ispolzovaniem impulsnoy elektrokhimicheskoy obrabotki poverkhnosti. Dis. Kand. nauk* [Improvement of design of products from copper and copper alloys using pulse electrochemical processing of a surface. Cand. Diss.]. Kostroma, KSTU Publ., 2002. 105 p.
- Galanin S.I., Viskovaty I.S. Electrochemical surface texturing of silver. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2015, vol. 51, no. 4, pp. 332–338.
- Galanin S.I., Viskovaty I.S., Bezdenezhnykh A.G. Decorative electrochemical invoicing of sterling silver surface. *Design. Theory and practice*, 2015, no. 19, pp. 73–81. In Rus.
- Grilikhes S.Ya., Tikhonov K.I. *Elektroliticheskie i khimicheskie pokrytiya. Teoriya i praktika* [Electrodeposited and chemical coatings. Theory and practice]. Leningrad, Khimiya Publ., 1990. 268 p.
- Voznesenskiy M.L. *Sposob formirovaniya na yuvelirnom izdelii dekorativnoy poverkhnosti (varianty) i yuvelirnoe izdelie, poluchennoe etim sposobom* [The way of jewel formation of a decorative surface (modification) and jewel, produced this way]. Patent RF, no. 2390424, 2010.
- Galanin S.I., Ivanova O.A. Elektrokhimicheskoe formirovanie dekorativnykh tsvetnykh plenok na poverkhnosti splava serebra SrM925 pri ispolzovanii impulsnykh tokov [Electrochemical forming of decorative color films on surfaces of 925 sample silver alloys using pulse current]. *Sbornik nauchnykh trudov molodykh uchyenykh KG TU* [Collection of Scientific Papers of young scientists of KSTU]. Kostroma, KSTU Publ., 2003. pp. 203–205.
- Kalinnikov I.V. *Povyshenie kachestva poverkhnosti splavov zolota 585 proby elektrokhimicheskim polirovaniem bipolyarnymi impulsami toka. Dis. Kand. nauk* [Improvement surface quality from gold alloys by electrochemical polishing using bipolar current pulses. Cand. Diss.]. Kostroma, KSTU Publ., 2010. 137 p.
- Galanin S.I., Viskovaty I.S. *Sposob dekorativnogo elektrokhimicheskogo fakturirovaniya poverkhnosti serebra* [The way of decorative electrochemical invoicing of silver surface]. Patent RF, no. 2569876, 2015.
- Bekkert M., Klemm Kh. *Spravochnik po metallograficheskoy travleniyu* [Metallographic etching manual]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 336 p.
- Lebedeva T.V. *Izmerenie tolshchiny zashchitno-dekorativnykh pokrytiy* [Measurement of thickness of protective and decorative coatings]. Kostroma, KSTU Publ., 2005. 10 p.

18. Galanin S.I., Grishina E.P., Ivanova O.A. Regularities of film forming at electrochemical polishing of silver and its alloys with copper in thiosulfate electrolyte. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2004, vol. 77, no. 8, pp. 1299–1302.
19. Nikulin V.N., Tsybin M.Z. Electrolytic polishing of silver in sodium thiosulphate solutions. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 1960, vol. 39, no. 2, pp. 469–471. In Rus.
20. Ivanova O.A. Ostsillograficheskoe issledovanie protsessov EKhp serebra i ego splavov SrM92,5 i SrM75,0 impulsnym tokom v tiosulfatnom elektrolite [Oscillographic research of silver ECP and its alloys 925 and 750 by pulse current in thiosulfate electrolyte]. *Vestnik KSTU*, 2004, vol. 9, pp. 69–71.
21. Gorelik S.S., Skakov Yu.A., Rastorguev L.N. *Rentgenograficheskii i elektronno-opticheskiy analiz* [Radiographic and electronic-optical analysis]. Moscow, MISIS Publ., 1994. 256 p.

Received: 18 January 2016.

Information about the authors

Sergey I. Galanin, Dr. Sc., professor, Kostroma State Technological University.

Ivan S. Viskovaty, graduate student, Kostroma State Technological University.

УДК 504.55.054:622(470.6)

ИСКУССТВЕННЫЕ ПОТОЛОЧИНЫ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧЕ РУД КАК АЛЬТЕРНАТИВА РУДНЫМ ЦЕЛИКАМ

Голик Владимир Иванович¹,
v.i.golik@mail.ru

Разоренов Юрий Иванович¹,
yiri1963@mail.ru

Лукьянов Виктор Григорьевич²,
lukyjanov@tpu.ru

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

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

Актуальность работы обусловлена необходимостью минимизации потерь руды в оставляемых для различных целей целиках, как условия удовлетворения неуклонно возрастающей потребности в сырье для производства металлов при ухудшении условий разработки рудных месторождений.

Цель работы: обоснование технической возможности и экономической целесообразности использования дифференцированных по прочности и функциям искусственных бетонных потолочин взамен рудных целиков.

Методы исследования: анализ теоретического наследия российской и зарубежной геомеханических школ, передового опыта разработки сложноструктурных месторождений и проектные проработки на основе теории жестко защемленной в опорах плиты с максимальной нагрузкой в опорах и шарнирах. На примере разработки месторождения Северного Казахстана системой подэтажных ортов в пределах структурно-неоднородного горного массива описана возможность комбинирования конструкций и технологий возведения потолочин: сплошной несущей потолочины и сопряженной с ней «облегченной» потолочины над остальной частью блока; упрочнение замагазинированной руды подачей на нее твердеющей смеси, с получением экономического эффекта.

Результаты. Предложены варианты искусственной потолочины на основе твердеющих бетонных смесей, дифференцированно учитывающие механизм проявления горного давления в разрабатываемых участках рудного поля. Доказано, что искусственные потолочины способны конкурировать с рудными целиками, особенно при разработке ценных металлических руд.

Выводы. При отработке запасов ценных руд в геологически нарушенных и дезинтегрированных массивах строительство искусственных потолочин, как альтернативы рудным целикам, является способом уменьшения опасности горных работ и повышения качества извлекаемых руд, что является резервом оздоровления экономики современного горного производства.

Ключевые слова:

Порода, массив, потолочина, выработка, твердеющая смесь, бетон, руда, platform, прочность.

Введение

При изменении экономической системы хозяйствования приобрели актуальность поиски собственных резервов для выживания горных предприятий. Одним из них является повышение качества добываемого минерального сырья и снижение опасности обрушения пород путем управления состоянием напряженно-деформированных рудомещающих массивов с использованием искусственных потолочин [1].

Искусственная потолочина является одним из вариантов использования прогрессивной технологии с закладкой техногенных пустот твердеющими смесями, позволяющей решать ряд экономических и экологических задач, актуальность которых повышается с уменьшением запасов месторождений и увеличением объема добычи сырья при снижении содержания полезных компонентов.

Деятельность горных предприятий оценивается корректностью извлечения запасов из недр. Важным направлением оптимизации является

уменьшение объема руд, оставляемых в недрах для обеспечения сохранности массива. Это относится в первую очередь к проблеме неизвлекаемых или извлекаемых с потерями запасов целиков [2].

Практика показывает, что снижение величины ущерба от потерь руды при строительстве искусственных потолочин вместо оставления рудных целиков компенсирует увеличение затрат на них. Потолочина решает одновременно две задачи горного производства: защита выработок от критических напряжений и предотвращение примешивания пород к добываемой руде [3].

Большинство мощных металлических месторождений разрабатывают подземным способом системами с подэтажной выемкой [3]. Слагающие их рудные тела локализованы в структурно-неоднородных напряженно-деформированных массивах, ослабленных процессами дезинтеграции. Такие массивы характеризуются геологической нарушенностью, выветрелостью и дезинтеграцией на верхних горизонтах.

Объекты и методы исследования

Месторождение Северного Казахстана разрабатывали системой поэтажных ортов в пределах структурно-неоднородного горного массива [4]. Очистная выемка сопровождалась обрушением пород кровли и боков с развитием процессов сдвижения.

Для разрешения неблагоприятной геомеханической ситуации применили комбинацию технологических операций: инъецирование обрушенных пород в секциях; строительство на уровне горизонта искусственной комбинированной кровли из сплошной несущей потолочины и сопряженной с ней «облегченной» потолочины над остальной частью блока; упрочнение замагазинированной руды подачей на нее твердеющей смеси.

В массиве выделены зоны активного сдвижения с перемещением блоков пород более чем на 200 мм, зоны пассивного сдвижения с перемещением блоков пород до 200 мм и зоны в разной степени нарушенных пород различной мощности и ориентировки.

Зона наклонного разлома мощностью 4–6 м, сложенная интенсивно раздробленными вмещающими породами, падала под углами 40° – 50° , пересекая камеры. Она стала причиной обрушения пород со скоростью около 7,5 м/с на высоту 30 м от уровня горизонта. Одновременно с формированием свода обрушения в массиве происходило сдвижение пород различной интенсивности по зоне наклонного разлома (рис. 1).

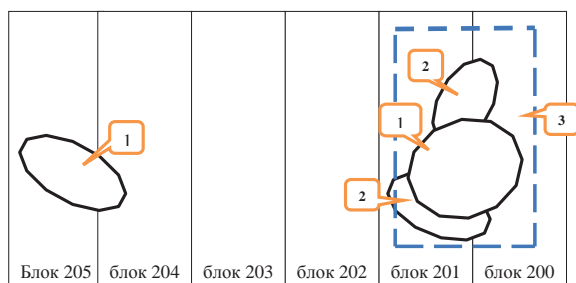


Рис. 1. Расположение участков массива с различной нарушенностью: 1 – зона активного сдвижения пород; 2 – зона пассивного сдвижения пород; 3 – контур искусственной потолочины

Fig. 1. Arrangement of array sections with different fracturing: 1 is the area of active rock displacement; 2 is the area of passive rock displacement; 3 is the loop of faux ceiling

Нагрузка налегающих пород на искусственную потолочину составляла: на участке активного сдвижения – около 80 %, а на участке пассивного сдвижения – 60 % от массы зоны сдвижения. Максимальная высота развития зон сдвижения не превышала 30 м. Углы падения систем трещин и тектонических разрывов изменялись от 70° до 80° . Объемный вес пород – 2,7 т/м³.

Радикальная нейтрализация влияния ослабляющих структур и улучшение всех показателей очистных работ обеспечивается созданием комби-

нированной искусственной кровли, включающей элементы: инъецированные цементным раствором породы; сплошную бетонную конструкцию; облегченную бетонную конструкцию в комбинации с анкерной крепью [5].

Комбинированная потолочина включала элементы:

- инъецированные цементным раствором обрушенные породы;
- сплошную бетонную потолочину, в основе которой или железобетонная плита из заложённых высокопрочной твердеющей смесью и связанных друг с другом железобетонными штангами заходок, или железобетонные балки из заложённых высокопрочной твердеющей смесью ортов и расщечек между ними, связанных железобетонными штангами;
- облегченную потолочину из заполненных высокопрочной твердеющей смесью и связанных с массивом и между собой железобетонными штангами заходок.

Для расчетов сплошную искусственную потолочину представляют в форме монолитной толстой плиты, жестко заземленной во вмещающих породах и изгибаемой под собственным весом и внешней нагрузкой, с достижением предельного состояния возле опор и в середине пролета (рис. 2) [6].

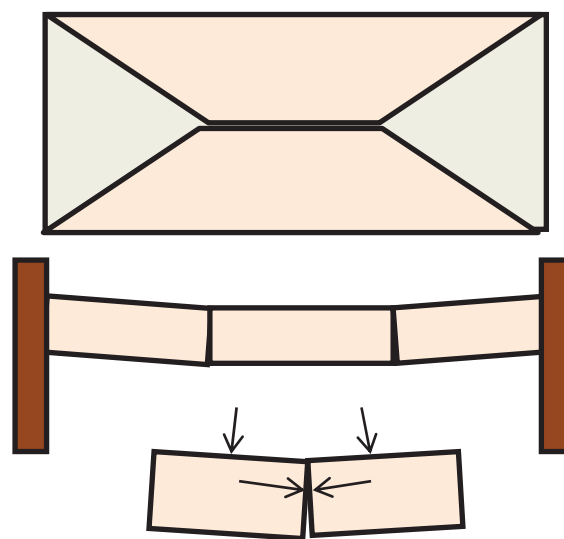


Рис. 2. Схема к расчету предельного состояния искусственной потолочины

Fig. 2. Diagram for calculation of the limit state of the faux ceiling

Породно-бетонная конструкция создается посредством инъецирования пород цементным раствором по скважинам, пробуренным по контуру свода с расстоянием между веерами 3 м и не более 4 м между концами скважин в веере.

Искусственная потолочина без несущей арматуры обеспечивает несущие функции преимущественно за счет прочности бетона (рис. 3).

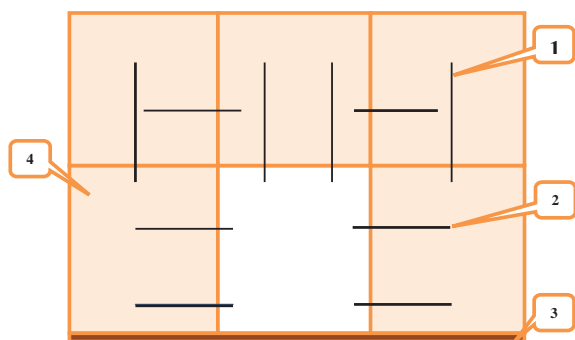


Рис. 3. Конструкция искусственной потолочины без армирования: 1 – вертикально расположенные анкеры; 2 – горизонтально расположенные анкеры; 3 – породная подушка; 4 – заложённая очистная выработка

Fig. 3. Design of the faux ceiling without reinforcement: 1 is the vertically arranged anchor; 2 is the horizontally arranged anchor; 3 is the rock cushion; 4 is the filled slope

Искусственная потолочина с несущей арматурой отличается использованием для упрочнения бетона железных конструкций (рис. 4).

Расчеты параметров потолочины позволяют дифференцировать ее конструкцию в зависимости от горно-геологической ситуации и размеров очистных выработок (рис. 5).

При строительстве сплошной искусственной потолочины выемка руды осуществляется наклонными (6° – 9°) секциями длиной не более 20 м. В боках заходок и искусственной кровле устанавливают железобетонные штанги с шагом 1 м [7].

При создании облегченной искусственной потолочины в бортах заходок с шагом 1 м устанавливают железобетонные штанги диаметром 30 мм, длиной 2 м, а на почве заходок укладывается арматура. Длина погашаемой секции не превышает 20 м, суммарное количество отмучиваемых тонко-

дисперсных частиц цемента, золы, шлака и глины – не менее 400 кг/м^3 . Нормативная прочность закладочной смеси 6–7 МПа.

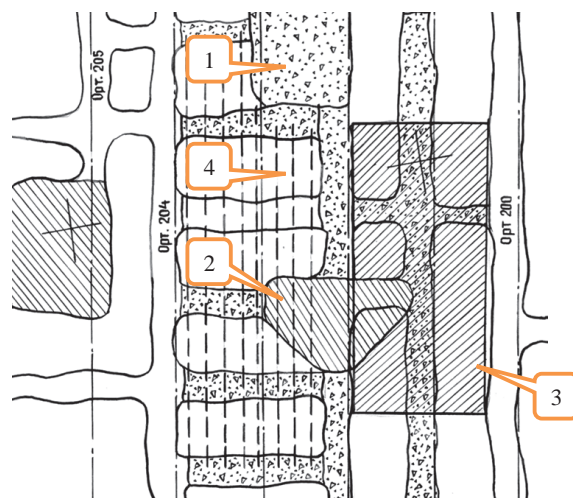


Рис. 5. Комбинированная искусственная потолочина: 1 – твердеющие смеси; 2 – инъекцированные породы; 3 – сплошная железобетонная потолочина; 4 – облегченная потолочина с железобетонными штангами

Fig. 5. Combined faux ceiling: 1 are the hardening mixtures; 2 are the injected rocks; 3 is the solid reinforced-concrete ceiling; 4 is the lightweight ceiling with reinforced-concrete bars

Вариант строительства потолочины путем подачи твердеющих смесей на отбитую руду может быть востребован при недостаточно устойчивой кровле. Искусственная потолочина в этом случае создается секциями длиной до 12 м. Отбойка руды производится взрыванием «в зажиме».

Подача закладочной смеси на замагазинированную руду осуществляется в две стадии. На пер-

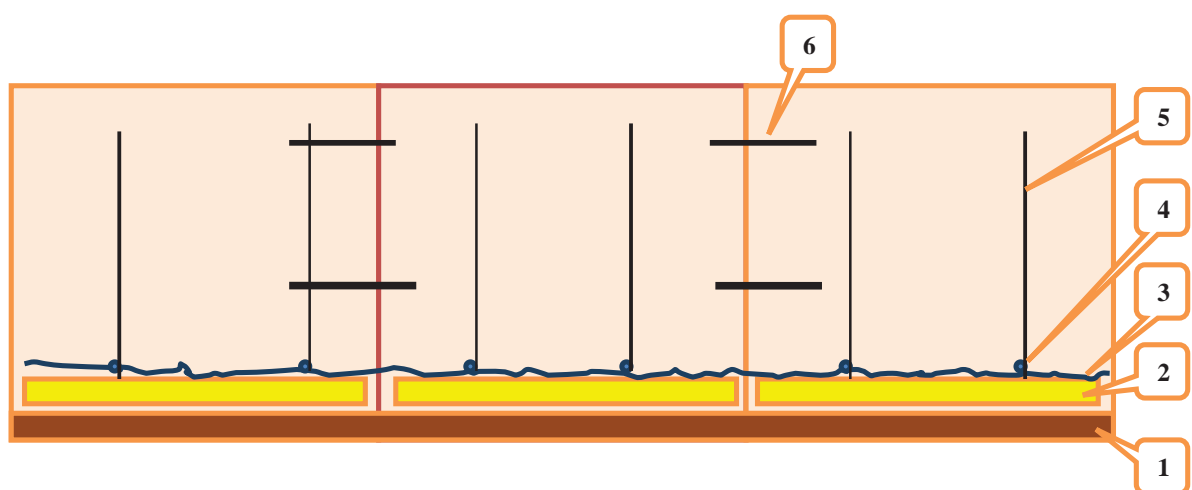


Рис. 4. Искусственная потолочина с несущей арматурой: 1 – породная подушка; 2 – лежень; 3 – сетка; 4 – горизонтальные анкеры; 5 – вертикальные анкеры; 6 – железобетонные анкеры

Fig. 4. Faux ceiling with bearing reinforcement: 1 is the rock cushion; 2 is the sill; 3 is the grid; 4 are the horizontal anchors; 5 are the vertical anchors; 6 are the reinforced-concrete anchors

вой стадии подается порция закладки с повышенным (до 300 кг/м³) количеством цемента при минимальном количестве воды для образования на поверхности замагазинированной руды цементной корки, препятствующей проникновению цементного раствора в руду. На второй стадии в потолочину укладывается основной объем твердеющей смеси [8].

Прочность твердеющих бетонных смесей при строительстве потолочин в зависимости от их функции по управлению состоянием массива сведена в таблицу.

Таблица. Прочность твердеющих смесей в потолочинах
Table. Strength of hardening mixtures in ceiling

| Параметры/Options | Единицы Units | Площадь, м ² Area, m ² | | |
|--|---------------|--|-------|-------|
| Длина и ширина потолочины Ceiling length and width | м/м | 6×6 | 12×12 | 18×18 |
| Эквивалентный пролет кровли Equivalent roof span | | 3 | 6 | 9 |
| Потолочина без армирования Ceiling without reinforcement | МПа/MPa | 6 | 8 | 10 |
| Потолочина с армированием Ceiling with reinforcement | | 3 | 4 | 5 |
| Облегченная конструкция Lightweight construction | | 2 | 3 | 4 |
| Инъектирование руды Injected ores | | 3 | 4 | 5 |

Выработанное пространство камеры на подэтажах изолируется перемычками, а устье закладочного трубопровода располагается в высшей точке камеры. В нижней части камеры укладывается слой закладки, нормативную прочность которой рассчитывают аналогично расчету монолитной бетонной плиты без несущей арматуры [9].

Основной объем камеры заполняется твердеющей смесью с пониженным расходом вяжущего, нормативная прочность которой рассчитывается из условия устойчивого вертикального обнажения искусственного массива.

В рассматриваемом рудном массиве породная масса в секции 205-1 инжектируется цементным раствором на высоту камеры, а в секции 202-1 – выше добычного горизонта. Одновременно с инжектированием устанавливаются железобетонные штанги и заполняются твердеющими смесями орты, расщелки между ними, а также другие выработки.

Затем проходят заходки для создания сплошной несущей потолочины. Выпуск горной массы из секции производится в два этапа: I – до уровня 600 м³ с подачей твердеющей смеси на замагазинированную руду; II – с полной закладкой твердеющей смесью.

Очистная выемка производится системой подэтажных ортов со сплошным порядком отработки секций от камер 202-1 и 205-1 к флангам рудного тела.

Отбойка секций камеры 205 начинается после инжектирования обрушенных пустых пород в ин-

тервале 236–176 м камеры 205-1. В блоке камер 200–204 в первую очередь отрабатывается камера 201, затем камера 202, камеры 200 и 203, а в последнюю очередь – камера 204.

Очистные работы под искусственной потолочиной начаты после инжектирования горной массы выше горизонта, выпуска руды и заполнения секций 202-1 твердеющей закладкой. Отбойка секций в камере 201 начата после набора прочности искусственной потолочины не менее 6,0 МПа.

Экономическое сравнение вариантов монолитного и железобетонного перекрытия для одного из рудников обнаруживает преимущество варианта с железобетонной основой: по стоимости – на 40 %, по трудоемкости – на 16 % [10].

Реализация технологии с заменой рудных целиков искусственными потолочинами может быть востребована на предприятиях депрессивных горнодобывающих регионов, например Северного Кавказа, где назрела необходимость технологической конверсии горного производства на основе инновационных ресурсосберегающих технологий [11].

Увеличение объема использования твердеющих смесей открывает перспективы утилизации неограниченных запасов хвостов переработки руд, которые могут быть вовлечены в производство после извлечения из них металлов методами инновационной технологии механохимической активации с выщелачиванием в дезинтеграторах [12]. Активированные отходы горно-металлургического производства могут использоваться как в качестве инертных заполнителей, так и в качестве вяжущих при комбинировании разнопрочных составов бетонной смеси [13].

Кроме повышения безопасности трудящихся на подземных горных работах комбинированные искусственные кровли способствуют увеличению качества добываемого минерального сырья за счет разделения выпускаемых руд и налегающих пород, что особенно актуально для выживания горных предприятий в период технологической диверсификации [14]. Повышение качества сырья существенно повышает конкурентоспособность товарной продукции горных предприятий и в определенных условиях обеспечивает финансовое благополучие [15]. Это относится в первую очередь к месторождениям с большим сроком эксплуатации, типа Садонских рудников, в недрах которых в прежние годы в целиках были оставлены руды с содержанием металлов, намного превосходящим сегодняшнее плановое содержание [16].

Использование искусственных потолочин представляет интерес в первую очередь как альтернатива оставлению рудных целиков с омертвлением значительной части запасов нередко ценных руд. Рудные потолочины считаются эффективным способом разработки водообильных месторождений, предотвращая прорывы воды и плывунов в горные выработки.

На Коробковском месторождении Курской магнитной аномалии руду добывают этажно-камерной системой разработки в пределах одного выемочного этажа под защитой предохранительной рудной потолочины, опирающейся на междукамерные целики. Потери руды в целиках составляют 60 %, что не может отвечать концепции рационального использования недр.

Работы, направленные на обеспечение эффективности и безопасности подземной разработки в обводненных массивах под рудными потолочинами на упругом основании из междукамерных целиков, не могут быть эффективными, потому что добываемые комплексные руды по извлекаемой ценности многократно превышают стоимость затрат на строительство искусственных потолочин на основе специальных бетонов.

Эффективность и безопасность добычи руд под защитой потолочин во многом определяется надежностью применяемых способов прогноза и управления состоянием конструктивных элементов систем разработки как следствия природных и техногенных геомеханических процессов.

Для оценки состояния твердых дискретных пород используется гипотеза балок, усовершенствованная трудами В.Д. Слесарева, А.А. Борисова, С.В. Ветрова, В.И. Борщ-Компанийца и др.

В работах Д.М. Казикаева, Г.Г. Суржина, Б.А. Фомина предохранительная потолочина рассматривается как однородная изотропная пластина, шарнирно опертая по контуру, что не совсем корректно учитывает геологическую нарушенность массива.

Кроме геомеханической компоненты использованию рудных потолочин присуща технологическая особенность. Со временем происходит уменьшение ее размеров вследствие природной дезинтеграции, механического влияния взрывных работ, извлечения особо ценных руд и т. п., что не может быть компенсировано в процессе эксплуатации.

Устойчивость металлической крепи в рудном массиве, подвергшемся горному удару, рассмотрена в работе [17, 18]. Оценка устойчивости массивов рудных месторождений на стадии проектных работ выполнена В. Dold и L. Weibel [19]. Рекомендации по совершенствованию технологий анкерного упрочнения природно-техногенных массивов даны в трудах S. Fiscor [20].

Проблема уменьшения опасности горных работ и повышения качества извлекаемых руд превратилась в глобальную проблему современного горного производства, и любые шаги в этом направлении имеют важное значение, особенно для предприятий, которые оказались неготовыми к работе в условиях рынка [21].

Выводы

При отработке запасов ценных руд в геологически нарушенных и дезинтегрированных массивах снижение качества извлекаемых руд может быть предотвращено строительством искусственных потолочин как альтернативы рудным целикам.

Использование возможности повышения устойчивости горного массива и связанного с этим качества добываемой руды путем применения описанных в статье методов является резервом оздоровления экономики современного горного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голик В.И., Ермоленко А.А., Лазовский В.Ф. Организационно-экономические проблемы использования природных ресурсов Южного федерального округа. – Краснодар: ЮИМ, 2008. – 328 с.
2. Гурьев Г.Т., Воробьев А.Е., Голик В.И. Человек и биосфера: устойчивое развитие. – Владикавказ: Терек, 2001. – 474 с.
3. Ляшенко В.И. Совершенствование добычи полезных ископаемых комбинированными способами выщелачивания // Горный журнал. – 2001. – № 1. – С. 9–14.
4. Актуальные вопросы добычи цветных, редких и благородных металлов / В.К. Бубнов, В.И. Голик, А.М. Капканщиков, А.Е. Воробьев, З.М. Хадонов, И.В. Поляцкий, Н.К. Руденко, А.В. Югай, О.З. Габараев, Т.В. Чекушина. – Акмола: Жана-Арка, 1995. – 601 с.
5. Голик В.И., Алборов И.Д. Охрана окружающей среды утилизацией отходов горного производства. – М.: Недра, 1995. – 125 с.
6. Ляшенко В.И., Колоколов О.В. Совершенствование технологии подземного выщелачивания при разработке рудных месторождений сложной структуры // Науковий вісник НГУ. – 2006. – № 7. – С. 11–17.
7. Извлечение золота из хвостов золотоизвлекательной фабрики с использованием процесса агломерационной флокуляции / Н.К. Алгебраистова, А.В. Макшанин, Е.А. Бурдакова, А.С. Маркова // ГИАБ. – 2013. – № 12. – С. 98–106.
8. Терентьев Б.Д., Мухин С.Е. Перспективы развития добычи и использования антрацитов Восточного Донбасса // ГИАБ. – 2013. – № 12. – С. 56–77
9. Теория и практика добычи полезных ископаемых для комбинированных способов выщелачивания / В.К. Бубнов, Э.К. Спирин, А.М. Капканщиков, В.И. Голик, Ю.Н. Смирнов, А.Е. Воробьев, А.М. Сытников, Л.И. Евсеев, В.И. Пигульский, С.П. Заборцев, Н.К. Руденко, В.М. Береза, В.А. Шамонин. – Акмола: Жана-Арка, 1992. – 545 с.
10. Маслеников С.А., Шинкарь Д.И., Прокопенко К.Д. Экономический эффект от применения крепи с управляемым режимом работы // Труды Междунар. научно-практ. конф. «Перспективы развития горного дела и подземного строительства». – Киев: Підприємство УВОІ «Допомага», 2013. – С. 12–17.
11. Дребенштетт К. Ответственное использование и защита литосферы // Материалы 6-го горного коллоквиума / Фрайбергская горная академия. – Фрайберг, 2012. – С. 69–77.
12. Белова А.Г., Корнилов С.В. О технологической платформе «Твердые полезные ископаемые» // Горный журнал. – 2012. – № 1. – С. 34–40.
13. Ермолович Е.А., Шок И.А. Техногенные отходы в составе складочных композиционных материалов // Горный журнал. – 2012. – № 9. – С. 78–84.
14. Архипов Г.И. Горнорудная промышленность в экономике Дальневосточного региона // Горный журнал. – 2013. – № 2. – С. 104–108.

15. Хашева З.М. Функции внутренней среды региональных экономических систем. Экономика и предпринимательство. – 2013. – № 4 (33). – С. 75–77.
16. Ракишев Б.Р. Комплексное использование руды на предприятиях цветной металлургии Казахстана // Горный журнал. – 2013. – № 7. – С. 78–85.
17. Gu Beiserner Schachttubbingaulenausbau – Historie, Schadenarten und Reparaturvarianten // Report. – 1999. – P. 12–16.
18. Large scale field tests of hightensile steel wire mesh in combination with dynamic rock bolts subjected to rock burst loading / R. Bucher, M. Cala, A. Zimmermann, C. Balg, A. Roth // 7th Int. Symp. on Ground Support in Mining and Underground construction. – Australia, 2013. – P. 56–64.
19. Dold B., Weibel L. Biogeometallurgical pre-mining characterization of ore deposits: an approach to increase sustainability in the mining process // Environmental Science and Pollution Research. – 2013. – № 11. – P. 7777–7786.
20. Fisor S. Roof bolting technology // Coal Age. – 2012. – V. 117. – № 5. – P. 26–30.
21. Плешко М.С., Насонов А.А. Внедрение эффективных геотехнологий на основе комплексного мониторинга всех стадий жизненного цикла горнодобывающего предприятия // ГИАБ. – 2013. – № 11. – С. 69–76.

Поступила: 26.01.2016 г.

Информация об авторах

Голик В.И., доктор технических наук, профессор Северо-Кавказского государственного технологического университета.

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

Лукьянов В.Г., доктор технических наук, профессор Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 504.55.054:622(470.6)

FAUX CEILING AT UNDERGROUND MINING AS AN ALTERNATIVE TO ORE PILLAR

Vladimir I. Golik¹,
vigolik@mail.ru

Yuri I. Razorenov¹,
yiri1963@mail.ru

Victor G. Lukyanov²,
lukyanov@tpu.ru

¹ North-Caucasian State Technological University,
44, Nikolaev street, Vladikavkaz, 362021, Russia.

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

Relevance of the research is caused by the necessity to minimize ore losses in pillars, left for different purposes, for meeting a steadily increasing demand for raw materials to produce metals when ore field development conditions deteriorate.

The aim of the research is to study the feasibility and economic viability of using strength and function differentiated faux concrete ceiling instead of ore pillars.

Methods: analysis of theoretical heritage of Russian and foreign geomechanical schools, advanced experience in developing complex fields and design studies based on the theory of a plate clamped rigidly with maximum load in the bearings and hinges. The paper describes the possibility of combining ceiling construction design and technologies: solid carrier ceiling and "lite" ceiling conjugated to the latter over the rest part of the block by the example of the Northern Kazakhstan field development by the system of axes sublevel within the structurally inhomogeneous rock mass; hardening the left in store ore by feeding hardening mixture to it for obtaining economic benefits.

Results. The authors have proposed the variants of faux ceiling based on hardening concrete mixtures, taking into account the mechanism of rock pressure in the developed areas of the ore field. It is proved that the faux ceiling can compete with the ore pillars, especially at development of valuable metal ores.

Conclusions. When developing the valuable ore reserves in geologically disturbed and disintegrated arrays the construction of faux ceiling, as an alternative to ore pillars, is a way to reduce the risk of mining operations and improve the quality of the extracted ore. This is the reserve of economic recovery in current mining.

Key words:

Breed, array, ceiling, development, hardening mixture, concrete, ore, stove, strength.

REFERENCES

- Golik V.I., Ermolenko A.A., Lozovskiy V.A. *Organizatsionno-ekonomicheskie problem ispolzovaniya prirodnykh resursov Yuzhnogo federalnogo okruga* [Organizational and economic problems of using natural resources in the Southern Federal District]. Krasnodar, YuIM Publ., 2008. 328 p.
- Guriev G.T., Vorobiev A.E., Golik V.I. *Chelovek i biosfera: ustoychivoe razvitiye* [Man and biosphere: sustainable development]. Vladikavkaz, Terek Publ., 2001. 474 p.
- Lyashenko V.I. Improving mining by the combined leaching. *Mining journal*, 2001, no. 1, pp. 9–14. In Rus.
- Bubnov V.K., Golik V.I., Kapkanschchikov A.M., Vorobyev A.E., Hadonov Z.M., Polyatsky I.V., Rudenko N.K. Yugay A.V., Gabaraev O.Z., Chekushina T.V. *Aktualnye voprosy dobychi tsvetnykh metallov* [Topical issues of producing non-ferrous, rare and precious metals]. Akmola, Zhana-Arka Publ., 1995. 601 p.
- Golik V.I., Alborov I.D. *Okhrana okruzhayushchey sredy utilizatsiy otkhodov gornogo proizvodstva* [Environmental protection by mining waste recycling]. Moscow, Nedra Publ., 1995. 125 p.
- Lyashenko V.I., Kolokolov O.V. Sovershenstvovanie tekhnologii podzemnogo vyshchelachivaniya pri razrabotke rudnykh mestorozhdeniy slozhnoy struktury [Improvement of underground leaching technology in development of ore deposits of complex structure]. *News of NSU*, 2006, no. 7, pp. 11–17.
- Algebraistova N.K., Makshanin A.V., Burdakova E.A., Markova A.S. Gold recovery from the tailings gold recovery plant using flocculation sintering process. *GIAB*, 2013, no. 12, pp. 98–106. In Rus.
- Terentyev B.D., Mukhin S.E. Prospects of development of anthracite production and use in Eastern Donbass. *GIAB*, 2013, no. 12, pp. 56–77. In Rus.
- Bubnov V.K., Spirin E.K., Kapkanschchikov A.M., Golik V.I., Smirnov Yu.N., Vorobiev A.E., Sytnikov A.M., Evseev L.I., Pigulsky V.I., Zabortsev S.P., Rudenko N.K., Bereza V.M., Shamoin V.A. *Teoriya i praktika dobychi poleznykh iskopaemykh dlya kombinirovannykh sposobov vyshchelachivaniya* [Theory and practice of mining for combined leaching techniques]. Akmola, Zhana-Arka Publ., 1992. 545 p.
- Maslennikov S.A., Shinkar D.I., Prokopenko K.D. Ekonomichesky effect ot primeneniya krepki s upravlyаемym rezhimom raboty [Economic effect of application of a timber with a controlled mode of operation]. *Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Perspektivy razvitiya gornogo dela i podzemnogo stroitelstva* [Proc. of the Intern. Scient. Conf. Prospects for development of mining and underground construction]. Kiev, Dopolmoga Publ., 2013. pp. 12–17.
- Drebenshtedt K. Otvetstvennoe ispolzovanie i zashchita litosfery [Responsible use and protection of lithosphere]. *Materialy shestogo gornogo kollokviuma* [Materials of the 6th Mining Colloquium]. Freiberg, 2012. pp. 69–77.
- Belova A.G., Kornilkov S.V. The technology platform «Solid Minerals». *Mining journal*, 2012, no. 1, pp. 34–40. In Rus.

13. Ermolovich E.A., Shock I.A. Technogenic waste as a part of filling composites. *Mining journal*, 2012, no. 9, pp. 78–84. In Rus.
14. Arkhipov G.I. Mining in the economy of the Far Eastern region. *Mining journal*, 2013, no. 2, pp. 104–108. In Rus.
15. Khasheva Z.M. Functions of internal media of regional economic systems. *Journal of Economy and Entrepreneurship*, 2013, no. 4 (33), pp. 75–77. In Rus.
16. Rakishev B.R. Complex use of ore at the enterprises of nonferrous metallurgy of Kazakhstan. *Mining journal*, 2013, no. 7, pp. 78–85. In Rus.
17. Gu Beiserner Schachttubbingssaulenausbau – Historie, Schadenarten und Reparaturvariante. *Report*, 1999, pp. 12–16.
18. Bucher R., Cala M., Zimmermann A., Balg C., Roth A. Large scale field tests of hightensile steel wire mesh in combination with dynamic rock bolts subjected to rock burst loading. *7th Int. Symp. on Ground Support in Mining and Underground construction*. Australia, 2013, pp. 56–64.
19. Dold B., Weibel L. Biogeometallurgical pre-mining characterization of ore deposits: an approach to increase sustainability in the mining process. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, no. 11, pp. 7777–7786.
20. Fiscor S. Roof bolting technology. *Coal Age*, 2012, vol. 117, no. 5, pp. 26–30.
21. Pleshko M.S., Nasonov A.A. Introduction of the effective geotechnologies based on comprehensive monitoring of all stages of the mining enterprise lifecycle. *GLAB*, 2013, no. 11, pp. 69–76. In Rus.

Received: 26 January 2016.

Information about the authors

Vladimir I. Golik, Dr. Sc., professor, North-Caucasian State Technological University.

Yuri I. Razorenov, Dr. Sc., professor, rector, North-Caucasian State Technological University.

Victor G. Lukyanov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.316.11.001.5

К ПРОБЛЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Харлов Николай Николаевич¹,

rcr@tpu.ru

Ушаков Василий Яковлевич¹,

vyush@tpu.ru

Тарасов Евгений Владимирович¹,

rcr@tpu.ru

Булыга Леонид Леонидович¹,

rcr@tpu.ru

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

Актуальность работы обусловлена необходимостью исследования несинусоидальных режимов распределительных электрических сетей для получения более полной информации об эффективности транспорта электрической энергии. Прогнозирование показателей качества напряжения и потерь электрической энергии в элементах сети должно обеспечить минимизацию уровня потерь и тенденцию к улучшению качества.

Цель работы: исследование корреляционных связей и статистических распределений высших гармонических составляющих узловых напряжений и узловых токов распределительных электрических сетей 110 кВ, определение сглаживающих функций для расчета режима сетей в вероятностной постановке.

Методы исследования. Для моделирования несинусоидальных режимов распределительных сетей использован программный комплекс, реализованный на языке программирования Fortran. Данные для расчета были получены при проведении энергетического обследования Межрегиональной распределительной сетевой компании Сибири, а именно таких филиалов как: «Алтай-энерго», «Бурятэнерго» и «Красэнерго». Сбор необходимых данных был проведен при помощи анализатора количества и качества электрической энергии AR-5 «Circuitor». Осциллограммы напряжений и токов, содержащие 128 точек, были разложены в ряд Фурье. Проанализированы корреляционные зависимости между основной гармонической составляющей и высшими гармониками напряжения и тока. Сглаживание статистических распределений и получение их аналитических зависимостей осуществляется посредством представления закона распределения в виде ряда, основанного на нормальном законе распределения.

Результаты. Установлены статистические свойства распределений гармонических составляющих узловых напряжений и токов. Исследованы статистические распределения модулей высших гармонических составляющих узловых напряжений, позволившие определить зависимости уни- и мультимодальных статистических распределений и качества сглаживания.

Ключевые слова:

Несинусоидальность, несимметрия, режимы электрических сетей, высшие гармоники тока и напряжения, статистические распределения.

1. Постановка задачи

Проблема моделирования несинусоидальных режимов распределительных электрических сетей вытекает из необходимости расчета и прогнозирования показателей качества напряжения и потерь в элементах сети с целью обеспечения эффективности транспорта электрической энергии. Ее решение даст возможность улучшить качество напряжения и минимизировать потери электрической мощности и энергии на основе рационализации выбора оборудования и внедрения мероприятий управления режимами. Широкомасштабные обследования режимов распределительных сетей различных энергосистем России показали повышенный уровень несинусоидальности и несимметрии узловых напряжений и токов [1–2]. Несинусоидальные узловые напряжения вызывают загрузку линий токами гармонических составляющих, которые в условиях резонанса, вызванного нали-

чием распределенных вдоль трассы линий индуктивностей и емкостей проводов, увеличивают потери. Несимметрия токов и напряжений также влияет на величину потерь [3–8]. Таким образом, задачи улучшения качества напряжения и минимизации потерь электрической мощности и энергии в распределительных электрических сетях в аспекте обеспечения эффективности транспорта электроэнергии по существу представляют собой общую задачу. Решение ее возможно лишь на основе математических моделей, определяющих как качество режимных параметров (прежде всего напряжений и токов), так и общность режима сети. Разработка таких моделей – первоочередная задача на пути к сформулированной цели.

В настоящей статье обсуждаются результаты обследования режимов и соответствующих математических моделей для несинусоидальных режимов распределительных сетей.

2. Методика исследования

Приведенные ниже данные получены на основе обследований режимов десяти районных энергосистем России, отличающихся климатическими условиями и структурой нагрузки. При обследовании использованы анализаторы количества и качества электрической энергии производства фирмы Circutor (Испания). Обработка результатов осуществлялась с использованием как стандартного математического обеспечения, поставляемого с прибором, так и специализированных авторских программ. Прежде всего, проведены измерения модулей, действительных и мнимых составляющих узловых напряжений и токов. За начало отсчета принята первая гармоническая составляющая фазного узлового напряжения фазы «А», вектор которой совмещается с действительной осью. Время измерений составляло, как правило, одни сутки, а интервал между отдельными измерениями – 2,5 минуты. Таким образом, по каждому обследованному узлу получены следующие результаты: 570–580 измерений для каждой фазы. Осциллограммы напряжений и токов содержали 128 точек, что вполне достаточно для получения гармонических составляющих до пятидесятой гармоники включительно (согласно теореме Котельникова).

3. Результаты обследований и их обработка

Измерения показали, что все высшие гармонические составляющие модулей узловых напряжений и токов от измерения к измерению изменяются случайным образом (рис. 1). Это же относится к их действительным и мнимым составляющим.

Типичные многоугольники статистических распределений модулей напряжений и токов гармоник показаны на рис. 2.

Установлено, что распределения в общем случае являются как унимодальными, так и мультимодальными [9–11]. Причина мультимодальности распределений лежит в большом количестве факторов, определяющих режим, в частности в суточном изменении электропотребления (в первую очередь – состава электроприемников и их мощности). Высшие гармонические составляющие узловых токов, как правило, статистически с ними связаны. Это обстоятельство позволяет предположить, что реальные распределения высших гармонических составляющих являются суммой нескольких элементарных распределений, зависящих от режима гармоник основной частоты [12].

Модули основных и высших гармонических составляющих узловых напряжений и токов облада-



Рис. 1. Изменение модулей узловых напряжений и токов подстанции распределительной сети напряжением 110 кВ в течение суток

Fig. 1. Change of voltages and currents nodal modules of the substation of 110 kV distribution network during the day

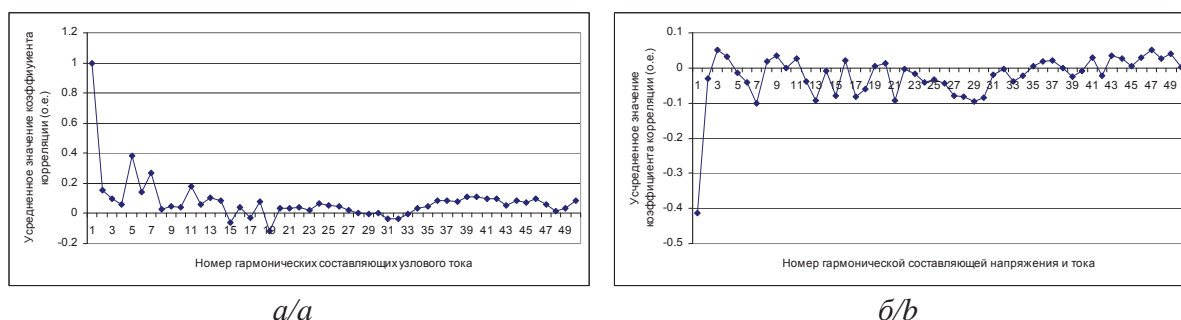


a/a

b/b

Рис. 2. Многоугольники суточных распределений статистических вероятностей модулей напряжения (а) и тока (б) четвертой гармоники фазы «А»

Fig. 2. Polygons of daily distributions of statistical probabilities of voltage (a) and current (b) modules of the fourth harmonic of the phase «А»



a/a

b/b

Рис. 3. Усредненное значение коэффициентов корреляции между модулями первой гармоники и модулями высших гармоник узлового тока (а); между модулями первой гармоники узлового напряжения и модулями высших гармоник узлового тока (б)

Fig. 3. Average value of the correlation coefficients between the modules of fundamental harmonic and higher current harmonics (а); between the modules of fundamental voltage harmonic and higher current harmonics (б)

ют статистическими связями. Несмотря на различие в климатических условиях и в составе нагрузок, удается установить некоторые закономерности в изменении корреляции отдельных параметров режима. Так, для обследованных энергосистем установлено, что линейная корреляция практически отсутствует между высшими гармоническими составляющими узловых напряжений. Это же относится к корреляции модуля первой гармоники узлового напряжения и к модулям высших гармоник узлового тока.

Значения коэффициентов линейной корреляции, полученные усреднением по результатам обследования 10 энергосистем, приведены на рис. 3.

Корреляция между модулями высших гармоник узлового напряжения и модулями высших гармоник узлового тока имеет место в основном между гармониками одинаковых номеров и для различных составляющих лежит в пределах 0,25–0,55 (рис. 4).

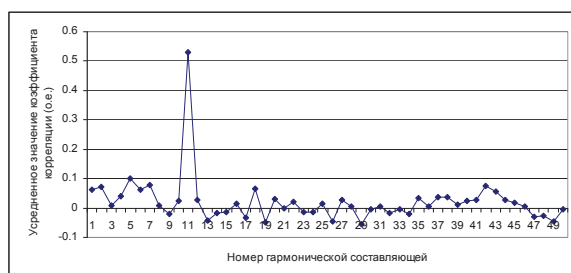


Рис. 4. Усредненное значение коэффициентов корреляции между модулем одиннадцатой гармоники узлового напряжения и модулями высших гармоник узлового тока

Fig. 4. Average value of the correlation coefficients between the module of the eleventh voltage harmonic and the higher current harmonic

На основании полученных результатов корреляционного анализа сделан вывод о линейных свойствах частотных характеристик входных сопротивлений обследованных узлов.

Сглаживание статистических распределений и получение их аналитических выражений позволяют в дальнейшем выполнять расчеты несинусоидальных режимов и потерь мощности и энергии в сложных электрических сетях в детерминированной и вероятностной постановке [13–17]. Одним из способов сглаживания статистических распределений и получения их аналитических зависимостей является представление закона распределения в виде ряда, основанного на нормальном законе распределения [18–20]. В этом случае функция плотности распределения имеет вид

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x} \left[\varphi\left(\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}\right) - \frac{1}{3!} \frac{D_{x^3}}{\sigma_x^3} \varphi^{(3)} \right. \\ \left. + \frac{1}{4!} \frac{D_{x^4}}{\sigma_x^4} \varphi^{(4)} \right. \\ \left. - \dots \right] \quad (1)$$

Здесь обозначения приняты в соответствии с [4]. Помимо общепринятых обозначений также присутствуют:

$$\varphi\left(\frac{x-m_x}{\sigma_x}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}},$$

$\varphi^{(n)}$ – n -я производная функции $\varphi(x)$ по x ; D_j – центральный момент j -го порядка случайной величины X .

Опуская исследования сходимости данного ряда, остановимся на исследовании значений коэффициентов, характеризующих статистическую асимметрию и статистический эксцесс и их влияние на сходимость сглаживающего ряда и на величину расхождения между теоретическим и статистическим распределениями (например, χ^2):

$$\gamma_{1X}^{**} = \frac{D_3^{**}}{(\sigma_X^{**})^3}; \gamma_{2X}^{**} = \frac{D_4^{**}}{(\sigma_X^{**})^4} - 3.$$

Исследования показали, что существует определенная закономерность в изменении значений γ_{1X}^{**} , γ_{2X}^{**} и значений χ^2 . На рис. 5 показаны графики изменения значений γ_{1X}^{**} , γ_{2X}^{**} для статистических распределений модулей гармонических составляющих узлового напряжения на шинах класса 110 кВ одной из подстанций Восточной Сибири, определенных в результате суточных измерений, а на рис. 6 – график изменения критерия χ^2 этих же распределений. Здесь отчетливо просматривается тенденция значительного уменьшения коэффициентов γ_{1X}^{**} , γ_{2X}^{**} и критерия χ^2 , вычисленного при сглаживании статистического распределения рядом (1) при возрастании номеров гармонических составляющих. Для нечетных гармонических составляющих узлового напряжения критерий χ^2 соответствует совпадению теоретической и статистической кривых с вероятностью не менее 0,7 (70 %) при числе «степеней свободы», равном 27.

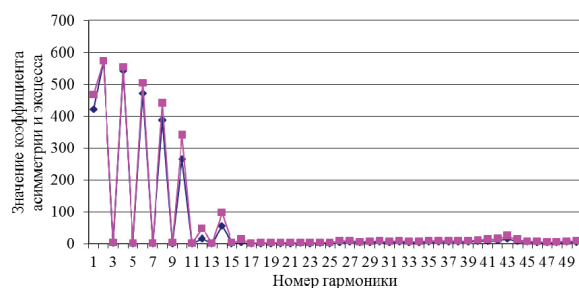


Рис. 5. Значения коэффициентов γ_{1X}^{**} , γ_{2X}^{**} для статистических распределений модулей гармонических составляющих узлового напряжения сети 110 кВ

Fig. 5. Value of coefficients γ_{1X}^{**} , γ_{2X}^{**} for statistical distributions of the harmonic components modules in node voltage of the 110 kV network

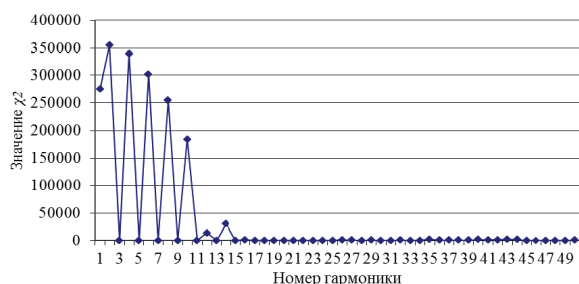


Рис. 6. Значения критерия χ^2 при сглаживании статистических распределений модулей гармонических составляющих узлового напряжения сети 110 кВ рядом из четырех первых слагаемых

Fig. 6. Values of the criterion χ^2 for smoothing the statistical distributions of the higher harmonic voltage modules (110 kV network) by the series of the first four terms

Принципиально иная картина наблюдается для модулей гармонических составляющих узловых токов, где только для отдельных гармонических составляющих наблюдались значения γ_{1X}^{**} , γ_{2X}^{**} , при которых статистическое распределение хорошо сглаживалось рядом (1).

К сожалению, рассмотренный подход к сглаживанию статистических распределений зачастую не обеспечивает сглаживание мультимодальных статистических распределений во всех случаях.

В качестве примеров «хорошего» и «плохого» сглаживания на рис. 7, 8 приведены гистограммы распределений и сглаживающие кривые, построенные на основе ряда (1) модулей седьмой гармонической составляющей узлового напряжения сети 110 кВ.

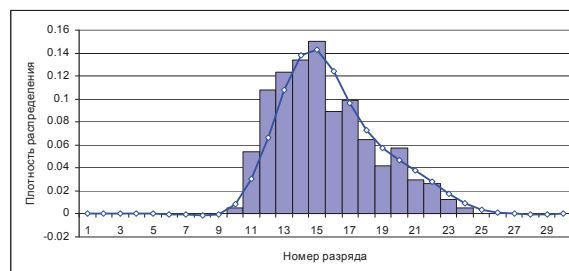


Рис. 7. Гистограмма распределения и сглаживающая кривая модулей седьмой гармонической составляющей узлового напряжения сети 110 кВ

Fig. 7. Distribution histogram and smoothing curve of the modules of the seventh higher harmonic of nodal voltages in the 110 kV network

Как показывает анализ статистических распределений, основной причиной «плохого» сглаживания на основе ряда (1) является их мультимодальность, в то время как рядом (1) достаточно хорошо сглаживаются одномодальные распределения. Для сглаживания мультимодальных статистических распределений требуются соответствующие модели, позволяющие учесть их специфику.

4. Выводы

1. В распределительных сетях энергосистем наблюдается тенденция к росту величины высших гармонических составляющих напряжений и токов. Проведенные обследования режимов позволили установить статистические свойства распределений гармонических составляющих узловых напряжений и токов. В частности, установлены корреляционные связи и их отсутствие между основными и высшими гармоническими составляющими. Так, установлено, что корреляция существует между гармоническими составляющими узловых напряжений и токов с одинаковыми номерами. Значение коэффициента корреляции изменяется в пределах 0,25–0,55, снижаясь с увеличением номера.
2. Статистические распределения модулей высших гармонических составляющих узловых напряжений нечетных порядков в распределительных электрических сетях 110 кВ достаточно хорошо сглаживаются рядами, основанными на нормальном законе распределения, что не относится к модулям четных гармоник напряжения.

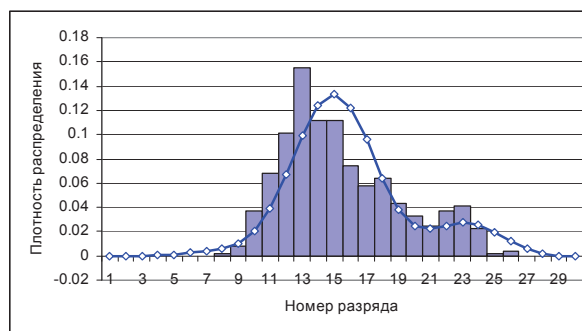
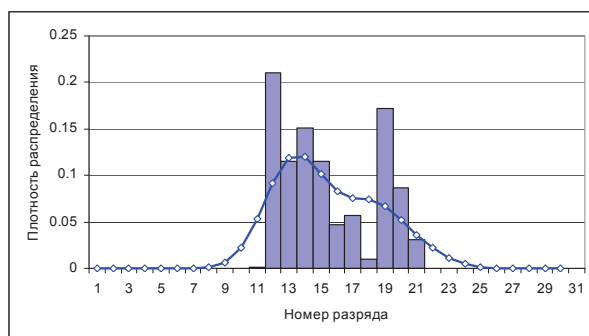


Рис. 8. Гистограммы распределения и сглаживающие кривые модулей первой и четвертой гармонической составляющей узлового тока сети 110 кВ

Fig. 8. Distribution histogram and smoothing curve of the modules of the first and the fourth higher harmonics of nodal current in the 110 kV network

3. Статистические распределения модулей высших гармонических составляющих узловых токов распределительных сетей 110 кВ как четных, так и нечетных порядков указанными рядами сглаживаются значительно хуже, но существует тенденция к улучшению сглаживания с ростом порядка гармоники.
4. «Плохое» сглаживание обусловлено, как правило, мультимодальностью статистических ра-

спределений. Причина мультимодальности распределений лежит в большом количестве факторов, определяющих режим, в частности в суточном изменении электропотребления. Для сглаживания мультимодальных статистических распределений требуются соответствующие модели, позволяющие учесть их специфику.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Режимные свойства электрических сетей 110 кВ юга России в обеспечении эффективности транспорта электроэнергии / В.С. Боровиков, М.В. Волков, В.В. Иванов и др. – Томск: STT, 2013. – 268 с.
2. Силаев М.А., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г. Влияние режимов работы энергосистем на несинусоидальность и несимметрию напряжений в магистральных электрических сетях // Сборник трудов Всероссийской конференции «Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление». – Иркутск, 2015. – С. 189–194.
3. Коверникова Л.И. Некоторые свойства параметров режимов гармоник в сети с распределенными нелинейными нагрузками // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Управление качеством электрической энергии». – Москва, 2014. – С. 101–108.
4. Смирнов С.С., Коверникова Л.И. Нормализация уровней напряжения высших гармоник в сетях высокого напряжения // Электричество. – 2000. – № 11. – С. 25–30.
5. Шаров Ю.В., Карташев И.И. Современные задачи управления качеством электроэнергии // Управление качеством электрической энергии: сборник трудов Международной научно-практической конференции. – М.: ООО «Центр полиграфических услуг "Радуга"». – Москва, 2014. – С. 74–81.
6. Zhezhelenko I.V., Sayenko Y.L., Electric losses, caused by high harmonics in electric power supply systems // Proc. of X International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation. – Łagów, Poland, 2010. – P. 98–105.
7. Suslov K.V., Stepanov V.S., Solonina N.N. Effect of High Harmonics on Electricity Consumers in Distribution Networks // Proc. of the 2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2013). – Brugge, Belgium, 2013. – P. 841–845.
8. Nicholson G., Gosbell V.J., Parsotam A. Analysis of harmonic distortion levels on a distribution network // Proc. of the Power Engineering Conference. – Perth, WA, 2007. – P. 1–7.
9. Боровиков В.С., Харлов Н.Н. Моделирование установившихся режимов сложных электрических сетей с нелинейными и несимметричными нагрузками // Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление: сборник статей Всероссийской конференции. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. – С. 229–286.
10. Грунин О.М., Пушков К.А. Совершенствование моделей и методов анализа установившихся режимов электрических систем // Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление: сборник статей Всероссийской конференции. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. – С. 361–65.
11. Energy loss estimation in distribution networks using stochastic simulation / Z. Mahmoodzadeh, N. Ghanbari, A. Mehrizi-Sani, M. Ehsan // Power & Energy Society General Meeting. – Denver, Colorado, 2015. – P. 1–5.
12. Богатырев Л.Л., Манусов В.З., Содномдорж Д. Математическое моделирование режимов электроэнергетических систем в условиях неопределенности. – Улан-Батор: Изд-во МГТУ, 1999. – 348 с.
13. Gamm A.Z., Koверnikova L.I. Estimation of nonsinusoidal operating conditions in electric networks on the basis of measurements // International review on modelling and simulations. – 2011. – P. 3051–3058.
14. Войтов О.Н., Гамм А.З., Голуб И.И. Управление потокораспределением в ЭЭС при вероятностном характере информации // Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление: сборник статей Всероссийской конференции. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. – С. 345–352.
15. Развитие алгоритмов оценивания состояния электроэнергетической системы / А.З. Гамм, А.М. Глазунова, Ю.А. Гришин, И.Н. Колосок, Е.С. Коркина // Электричество. – 2009. – № 6. – С. 2–9.

16. Sanjib Ganguly, Dipanjan Samajpati. Distributed generation allocation on radial distribution networks under uncertainties of load and generation using genetic algorithm // Sustainable energy. – 2015. – V. 6. – № 3. – P. 688–697.
17. Chun-Lien Su. Stochastic evaluation of voltages in distribution networks with distributed generation using detailed distribution operation models // Power systems. – 2010. – V. 25. – № 2. – P. 786–795.
18. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 1999. – 576 с.
19. Лившиц Н.А. Вероятностный анализ систем автоматического управления: в 2 т. Т. 1. Вероятностные и статические характеристики воздействий и процессов. Линейные стационарные и нестационарные системы / Н.А. Лившиц, В.Н. Пугачев. – М.: Советское радио, 1963. – 896 с.
20. Гамм А.З., Герасимов Л.Н. Оценивание состояния в электроэнергетике. – М: Наука, 1983. – 303 с.

Поступила 04.02.2016 г.

Информация об авторах

Харлов Н.Н., кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер Регионального центра ресурсосбережения Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ушаков В.Я., доктор технических наук, профессор кафедры электрических сетей и электротехники, директор Регионального центра ресурсосбережения Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Тарасов Е.В., аспирант кафедры электрических сетей и электротехники, инженер Регионального центра ресурсосбережения Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Булыга Л.Л., аспирант кафедры электрических сетей и электротехники, инженер Регионального центра ресурсосбережения Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.316.11.001.5

THE PROBLEM OF SIMULATION OF NON-SINUSOIDAL MODES IN DISTRIBUTED NETWORKS

Nikolay N. Kharlov¹,

rccr@tpu.ru

Vasilii Ya. Ushakov¹,

vyush@tpu.ru

Yevgeniy V. Tarasov¹,

rccr@tpu.ru

Leonid L. Bulyga¹,

rccr@tpu.ru

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

The relevance of the research of non-sinusoidal modes in distributed network consists in gathering full information about the efficiency of electric energy transportation. Prediction of voltage quality indices and electrical energy losses in network units should provide losses level minimization and trend to improve quality.

The main aim of the research is to study the correlations and statistical distributions of higher harmonics of nodal voltages/currents in 110 kV distributed networks, to determine smoothing functions for calculating Stochastic mode of networks.

The methods of the research. The authors have used the software implemented in Fortran programming to simulate the non-sinusoidal modes of distributed networks. The data for calculation were obtained during energy survey of Interregional Distribution Grid Company of Siberia, namely such branches as: «Altaienergo», «Buriatenergo» and «Krasenergo». The required data were collected by using portable power analyzer AR-5 «Circutor». Voltage and current oscillograms, consisting of 128 point, were expanded in the Fourier series. The authors analyzed the correlation dependences of fundamental harmonic and higher harmonics of voltage and current. Smoothing of statistical distributions and obtaining their analytical dependencies were achieved using probability distribution in a series based on the Gauss distribution.

The results. The authors determined the statistical properties of higher harmonics distributions in nodal voltages/currents and studied the statistical distributions of higher harmonics modules in nodal voltages/currents, which allowed determining uni- and multimodal dependencies of statistical distribution and smoothing quality.

Key words:

Non-sinusoidal, asymmetric, modes of electrical networks, higher harmonics of current and voltage, statistical distributions.

REFERENCES

1. Borovikov V.S., Volkov M.V., Ivanov V.V. *Rezhimnye svoystva elektricheskikh setey 110 kV yuga Rossii v obespechenii effektivnosti transporta elektroenergii* [Modal properties of 110 kV electric networks of Southern Russia to ensure the efficiency of electricity transmission]. Tomsk, STT Publ., 2013. 268 p.
2. Silayev M.A., Tulskiy V.N., Shamonov R.G. Vliyaniye rezhimov raboty energosistem na nesinusoidalnost i nesimmetriyu napryazheniy v magistralnykh elektricheskikh setyakh [Influence of operational modes of power systems on nonsinusoidality and voltage unbalance in the main electric networks]. *Sbornik trudov Vserossiyskoy konferentsii. Energetika rossii v XXI veke. Innovatsionnoye razvitiye i upravleniye* [Proc. of the All-Russian Conference. Energy of Russia in XXI century. Innovative development and management]. Irkutsk, 2015. pp. 189–194.
3. Kovernikova L.I. Nekotoryye svoystva parametrov rezhimov garmolik v seti s raspredelennymi nelineynymi nagruzkami [Some properties of the mode parameters of harmonics in the network with distributed non-linear loads]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Upravleniye kachestvom elektricheskoy energii* [Proc. of the International scientific and practical conference. Quality management of electrical energy]. Moscow, 2014. pp. 101–108.
4. Smirnov S.S., Kovernikova L.I. Normalization of voltage harmonics in networks of high voltage electricity. *Electrical Technology Russia*, 2000, no. 11, pp. 25–30. In Rus.
5. Sharov Yu.V., Kartashev I.I. Sovremennyye zadachi upravleniya kachestvom elektroenergii [Modern power quality management tasks]. *Upravlenie kachestvom elektricheskoy energii. Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Quality management of electrical energy. Proc. of the International scientific and practical conference.]. Moscow, 2014. pp. 74–81.
6. Zhezhelchenko I.V., Sayenko Y.L. Electric losses, caused by high harmonics in electric power supply systems. *Proc. of X International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*. Łagów, 2010. pp. 98–105.
7. Suslov K.V., Stepanov V.S., Solonina N.N. Effect of High Harmonics on Electricity Consumers in Distribution Networks. *Proc. of the 2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Brugge, 2013. pp. 841–845.
8. Nicholson G., Gosbel V.J., Parsotam A. Analysis of harmonic distortion levels on a distribution network. *Proc. of the Power Engineering Conference*. Perth, 2007. pp. 1–7.
9. Borovikov V.S., Kharlov N.N. Modelirovaniye ustanovivshikhsya rezhimov slozhnykh elektricheskikh setey s nelineynymi i nesimmetrichnymi nagruzkami [Simulation of steady-state regimes of complex electrical networks with nonlinear and asymmetric loads]. *Energetika Rossii v XXI veke. Innovatsionnoye razvitiye i upravleniye. Sbornik statey Vserossiyskoy konferentsii* [Energy of Russia in XXI century. Innovative development and management. A collection of articles]. Irkutsk, 2015. pp. 229–286.
10. Grunin O.M., Pashkov K.A. Sovershenstvovaniye modeley i metodov analiza ustanovivshikhsya rezhimov elektricheskikh sistem

- [Improvement of models and methods of analyzing the established modes of electrical systems]. *Energetika Rossii v XXI veke. Innovatsionnoye razvitie i upravleniye. Sbornik statey Vserossiyskoy konferentsii* [Energy of Russia in XXI century. Innovative development and management. A collection of articles]. Irkutsk, 2015. pp. 361–365.
11. Mahmoodzadeh Z., Ghanbari N., Mehrizi-Sani A., Ehsan M. Energy loss estimation in distribution networks using stochastic simulation. *Power & Energy Society General Meeting*. Denver, Colorado, 2015. pp. 1–5.
 12. Bogatyrev L.L., Manusov V.Z., Sodnomdorzh D. *Matematicheskoe modelirovanie rezhimov elektroenergeticheskikh sistem v usloviyakh neopredelennosti* [Mathematical modeling of modes of electric power systems with uncertainty conditions]. Ulan Bator, MGTU Press, 1999. 348 p.
 13. Gamm A.Z., Kovernikova L.I. Estimation of nonsinusoidal operating conditions in electric networks on the basis of measurements. *International review on modelling and simulations*, 2011, pp. 3051–3058.
 14. Voytov O.N., Gamm A.Z., Golub I.I. Upravlenie potokoraspredeleнием v EES pri veroyatnostom kharaktere informatsii [Load flow management in EES in probabilistic nature of information]. *Energetika v Rossii v XXI veke. Innovatsionnoye razvitie i upravleniye. A collection of articles* [Proc. of the All-Russian Conference. Energy of Russia in XXI century. Innovative development and management]. Irkutsk, 2015. pp. 345–352.
 15. Gamm A.Z., Glazunov A.M., Grishin Yu.A., Kolosok I.N., Korokin E.S. Development of algorithms for estimating the condition of the power system. *Electrical Technology Russia*, 2009, no. 6, pp. 2–9. In Rus.
 16. Sanjib Ganguly, Dipanjan Samajpati. Distributed generation allocation on radial distribution networks under uncertainties of load and generation using genetic algorithm. *Sustainable energy*, 2015, vol. 6, no. 3, pp. 688–697.
 17. Chun-Lien Su. Stochastic evaluation of voltages in distribution networks with distributed generation using detailed distribution operation models. *Power systems*, 2010, vol. 25, no. 2, pp. 786–795.
 18. Ventzel E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1999. 576 p.
 19. Livshits N.A., Pugachev V.N. *Veroyatnostny analiz sistem avtomaticheskogo upravleniya. T. 1. Veroyatnostnye i staticheskie kharakteristiki vozdeystviy i protsessov. Lineynye statsionarnye i nestatsionarnye sistemy* [Probabilistic analysis of automatic control systems. Vol. 1. Probability and static characteristics of effects and processes. Linear stationary and non-stationary system]. Moscow, Sovetskoye Radio Publ., 1963. 896 p.
 20. Gamm A.Z., Gerasimov L.N. *Otsenivanie sostoyaniya v elektroenergetike* [State assessing in power sector]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 303 p.

Received: 4 February 2016.

Information about the authors

Nikolay N. Kharlov, Cand. Sc., associate professor, chief engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vasilii Ya. Ushakov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Yevgeniy V. Tarasov, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Leonid L. Bulyga, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 537.871.5+530.1:528.871.6

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА ПО ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ ALOS PALSAR

Кирбижекова Ирина Ивановна¹,
kirbizhekova@bk.ru

Батуева Елизавета Владимировна¹,
elizavlad@ipms.bsnet.ru

¹ Институт физического материаловедения СО РАН,
Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6.

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания и развития технологии картирования лесной растительности с использованием спутниковых радиолокационных данных.

Цель работы: исследование возможности классификации хвойных и смешанных лесов Байкальского региона на основе поляриметрических радиолокационных данных и сезонных изменений поляриметрических свойств растительности в дециметровом диапазоне.

Методы исследования: преобразование матрицы рассеяния в когерентную и ковариантную матрицы; поляриметрическая декомпозиция методом Клода–Поттье; двух- и трехпараметрическая классификация с учетом зонального распределения параметров декомпозиции Клода–Поттье; поляриметрическая декомпозиция методом Фримана на объемную, поверхностную и двукратную составляющие рассеяния; оценка биомассы и плотности древостоя на основе соотношения весов компонент декомпозиции Фримана; расчет поляриметрических характеристик, таких как радарный вегетационный индекс, степень деполаризации и т. п.; сравнительный анализ разносезонных поляриметрических характеристик.

Результаты. Исследованы сезонные изменения радиолокационных поляриметрических характеристик хвойных и смешанных лесов Байкальского региона на основе данных дециметрового диапазона ALOS PALSAR. Выполнена поляриметрическая декомпозиция методами Клода–Поттье и Фримана и классификация на основе различий в составе и соотношении компонент разложения. Выявлены значительные сезонные вариации процессов рассеяния растительно-почвенных покровов. Установлено ослабление доминирующей роли объемного рассеяния в зимний период и усиление поверхностного рассеяния на радиолокационных изображениях, свидетельствующие о соответствующем изменении биомассы. На тестовом участке соснового леса обнаружено уменьшение объемной и двукратной компонент разложения Фримана в среднем на 3 дБ, что свидетельствует об изменении свойств проводимости лесной среды при отрицательных температурах.

Ключевые слова:

Радиолокационная поляриметрия, ALOS PALSAR, поляриметрические характеристики, поляриметрическая декомпозиция, классификация, сезонные изменения, лесные ресурсы.

Исследования методами дистанционного зондирования Земли текущего состояния и долговременных изменений окружающей среды, обусловленных факторами естественного и антропогенного происхождения, относятся к числу приоритетных научных направлений [1, 2]. На современном этапе возрастает роль аэрокосмических информационных технологий, основанных на применении радиоволновых систем. Радиолокационные методы дистанционного зондирования Земли находят широкое применение в узкоспециализированных и междисциплинарных научных исследованиях, в частности при изучении почвенных и растительных ресурсов, снежного и ледового покровов, просадок грунтов и оползневых явлений и т. д. [3–6]. Особо следует отметить перспективность применения спутниковой радиолокации для предупреждения, оценки и устранения последствий чрезвычайных ситуаций, связанных с лесными пожарами и наводнениями [7].

В настоящее время радары с синтезированной апертурой (РСА) позволяют получать изображения поверхности Земли с высоким (1–3 м) и сверхвысоким (менее 1 м) пространственным разрешением, аналогично оптическим сканерам. Но в от-

личие от оптической съемки спутниковая радиолокация не ограничена временем суток и погодными условиями [8]. Кроме того, благодаря высокой проникающей способности микроволнового излучения радиолокационные изображения содержат ценную информацию о геометрической структуре и физических свойствах почвенно-растительных покровов и подстилающих сред, что расширяет возможности их использования при решении разнообразных задач прикладного характера, в частности для картографии лесных ресурсов, оценки породного состава, биометрических характеристик и т. п. [9–12].

Взаимодействие поляризованных радиолокационных волн с объектами на земной поверхности в процессе отражения и рассеяния изменяет поляризацию. Характер изменений зависит от диэлектрической проницаемости, проводимости, температуры, влажности, особенностей рельефа, шероховатости поверхности и других характеристик объекта исследования [8]. Теоретические аспекты такого взаимодействия пока изучены не в полной мере. Тем не менее, к настоящему времени разработаны эффективные методы оценки тех или иных характеристик объектов на основе их радиолока-

ционных изображений и для решения прикладных задач в области картографии, экологии, геологии, гидрологии и пр. В частности, существуют отдельные примеры классификации лесной растительности с высокой степенью точности на основе радиолокационных данных, полученных в нескольких диапазонах длин волн, каналах поляризации и в разные моменты времени [3].

В данной работе представлены результаты исследования возможности применения поляриметрических радиолокационных данных дециметрового диапазона для классификации лесных ресурсов на примере Байкальского региона.

В Байкальский регион входят три субъекта Российской Федерации со схожими физико-географическими особенностями, объединенных принадлежностью к бассейну уникального озера Байкал. Для этой малонаселенной территории с общей площадью более 1,5 млн км² характерны преобладание гористого рельефа с мощными горными хребтами, резко континентальный климат с продолжительными холодными зимами и коротким жарким летним периодом. Для комплексного исследования природных объектов Байкальского региона в силу их значительной протяженности и труднодоступности актуально использование спутниковой информации. В частности, структура лесных массивов хорошо отражается на космических снимках благодаря индикационным свойствам – текстуре и цвету однородных контуров лесных ландшафтов. На основе дистанционных данных можно оценить как современное состояние лесных экосистем, так и изменения вследствие антропогенного воздействия, лесных пожаров и т. д., площадь участков здорового и поврежденного леса, провести количественный анализ биометрических характеристик растительности [13–15].

В ИФМ СО РАН по Байкальскому региону спутниковые радиолокационные данные с полной поляриметрической информацией представлены снимками в дециметровом L-диапазоне с длиной волны 24 см, полученными радаром с синтезированной апертурой ALOS PALSAR Японского аэрокосмического агентства JAXA во время миссии 2006–2011 гг. Размеры сцен на снимках – 20×65 км², пространственное разрешение ~25 м. Исследования проведены на двух тестовых участках смешанного (№ 1) и хвойного (№ 2) леса к западу и востоку от реки Селенги, их координаты – 52±05 с. ш., 106±24 в. д. и 52±10 с. ш., 106±50 в. д. соответственно.

Базовые аспекты теории и методы решения многочисленных прикладных задач на основе поляриметрических радиолокационных данных хорошо известны [3, 8]. Основной целью спутниковой поляризационной радиолокации является выявление параметров, которые в достаточной степени характеризуют объект исследования. Это позволяет решать обратную задачу по оценке физического состояния и свойств объекта на основе его поляриметрических характеристик.

Каждому пикселю радарного изображения соответствует матрица рассеяния S второго порядка, описывающая радиолокационный отклик в четырех поляризационных каналах при согласованной (горизонтально-горизонтальной hh или вертикально-вертикальной vv) и поперечной (горизонтально-вертикальной hv или вертикально-горизонтальной vh) ориентациях излучателя и приемника излучения. Элементы матрицы рассеяния S представлены в комплексной форме, использовать их для понимания процесса рассеяния электромагнитной волны на исследуемом объекте достаточно сложно. Поэтому часто прибегают к декомпозиции матрицы рассеяния на составляющие с более простой интерпретацией. Ранее исследования по классификации природных и искусственных объектов на радарных изображениях показали высокую эффективность таких методов декомпозиции, как метод Клода–Поттье и Фримана [16, 17].

Метод Клода–Поттье позволяет дифференцировать объекты в соответствии с типом механизмов рассеяния [18–21]. Для этого на основе собственных чисел λ_i матриц когерентности T или ковариантности C вычисляются три параметра: энтропия H , анизотропия A и параметр α .

Первый параметр, энтропия H , характеризует степень статистического беспорядка. Энтропия H изменяется по мере увеличения шероховатости поверхности от 0 для совершенно гладкой поверхности до 1 при наличии растительности и сложном рельефе. Второй параметр, анизотропия A , характеризует соотношение доминирующего (наибольшего) и минорных (вторичных) собственных чисел матрицы когерентности, т. е. распределение по типам механизмов рассеяния. Анизотропия A изменяется от 0 при равной доле разных типов рассеяния до 1 при доминировании какого-либо из них. Третий параметр α характеризует тип доминирующего механизма рассеяния, выражается в угловой мере и изменяется от 0° до 90°. При низких значениях (близких к 0°) доминирует рассеяние от поверхности относительно ровных участков земли и воды. При средних значениях параметра α (~45°) преобладает дипольный механизм рассеяния, характерный для растительности. При высоких значениях параметра α (близких к 90°) наибольший вклад в отраженный сигнал вносит двукратное и многократное отражение, в основном характерное для городской застройки. Для примера на рис. 1 представлены псевдоцветные изображения параметров для тестового участка (№ 1) смешанного леса и окружающих его земель сельскохозяйственного назначения.

Таким образом, каждому объекту на радарном изображении свойственны вполне определенные значения параметров H , A , α в соответствии с составом, комбинацией и распределением вклада основных и неосновных механизмов рассеяния. В поле параметров H – α все пиксели распределяются по 9 основным зонам.

По вертикали диаграмма $H-\alpha$ разделена на три области в соответствии с тремя типами рассеяния: однократного рассеяния от поверхности, объемного – от растительности и двукратного – от строений. По горизонтали – на области низкой, средней и высокой энтропии. То есть почвенному покрову без растительности соответствуют зоны поверхностного рассеяния средней и низкой энтропии 6 и 9. Лесной растительности соответствуют зоны объемного рассеяния высокой, средней и низкой энтропии 2, 5 и 8. Участкам городской застройки, не представленным на территории исследования, соответствуют зоны двукратного рассеяния высокой, средней и низкой энтропии 1, 4 и 7. Теоретически невозможны значения параметров в зоне 3 (поверхностное рассеяние высокой энтропии).

Больше возможностей для интерпретации предоставляет комбинация параметров. Если классификация на основе двух показателей позволяет выделить до 8 классов, то на основе всех трёх – до 16. На рис. 2 представлен пример распределе-

ния пикселей на двумерной диаграмме $H-\alpha$ (рис. 2, а), а также результаты двумерной $H-\alpha$ (рис. 2, б) и трехмерной $H-A-\alpha$ -классификации (рис. 2, в). Сравнение с наземными данными свидетельствует о достаточно высокой точности трехпараметрической $H-A-\alpha$ -классификации, отражающей морфологические особенности растительно-почвенных покровов мезомасштаба для территории исследования [22].

Результаты классификации радарных изображений также позволяют выявить локальные вариации. Для почвенного покрова они обусловлены главным образом типом почвы и градицией влажности, а для лесных массивов – биометрическими характеристиками и физическими условиями (температура, влажность и др.).

При сравнении результатов декомпозиции методом Клода-Поттье, полученных на основе разносезонных изображений ALOS PALSAR, были выявлены значительные изменения процессов рассеяния в лесных массивах и на участках с редкой ра-

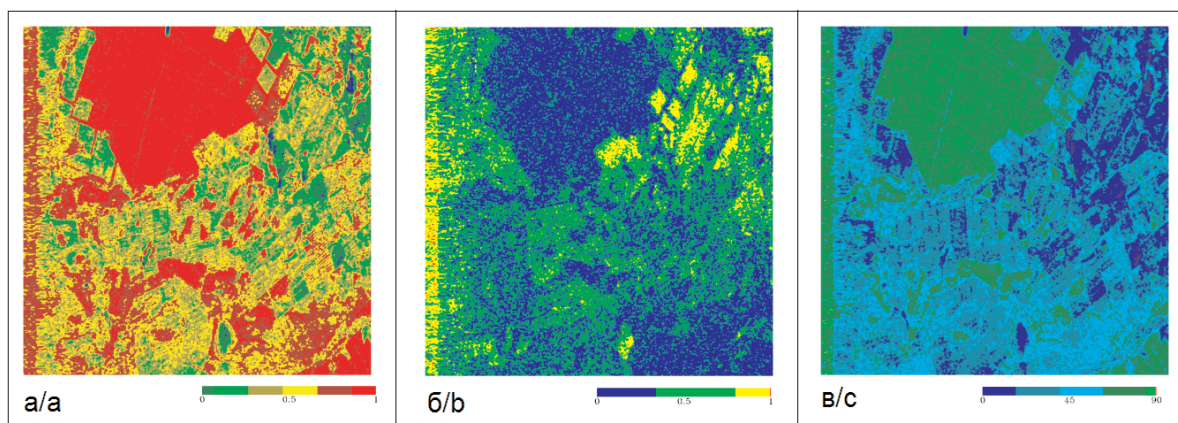


Рис. 1. Параметры декомпозиции Клода-Поттье для тестового участка № 1 по данным ALOS PALSAR от 30 мая 2006 г.: а) энтропия H ; б) анизотропия A ; в) параметр α

Fig. 1. Parameters of Claude-Pottier decomposition for test site № 1 by the ALOS PALSAR data on May 30, 2006: а) entropy H ; б) anisotropy A ; в) parameter α

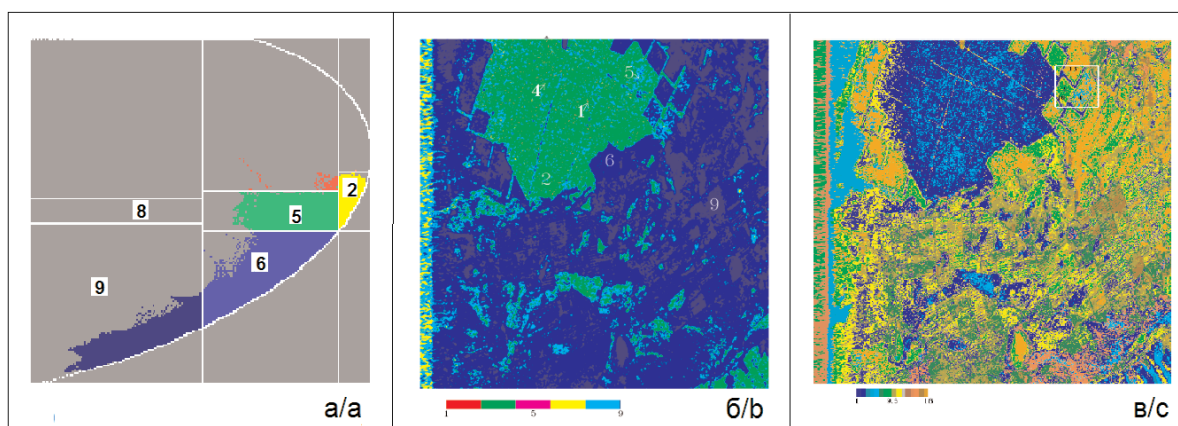


Рис. 2. Результаты $H-A-\alpha$ -классификации для тестового участка № 1: а) распределение пикселей в поле параметров $H-\alpha$; б) результат классификации по двум параметрам $H-\alpha$; в) результат классификации по трем параметрам $H-A-\alpha$

Fig. 2. Results of $H-A-\alpha$ -classification for test site № 1: а) pixels distribution in the field of $H-\alpha$ parameters; б) result of classification by two parameters $H-\alpha$; в) result of classification by three parameters $H-A-\alpha$

стительностью. В частности, при сравнительном анализе поляриметрических данных двух последовательных съемок ALOS PALSAR от 28 сентября и 13 ноября 2006 г. установлено, что в зимний период по территории горного массива Хамар-Дабан и долины реки Селенги происходит существенное снижение доминирующей роли объемного рассеяния высокой и средней энтропии с 39,41 до 21,75 %. Одновременно наблюдается рост доминирующей роли поверхностного рассеяния средней и низкой энтропии с 61,14 до 78,25 %. В целом в зимнее время на 20 % исследуемой территории доминирующая роль перешла от объемной составляющей процесса рассеяния радиолокационного импульса к поверхностной. Частично это обусловлено уменьшением надземной биомассы в зимний период, частично – сезонными изменениями рассеивающих характеристик почвенно-растительных покровов в дециметровом диапазоне, особенно существенными при снижении температуры до отрицательных значений и с установлением снежного покрова.

Для более детального исследования лесной растительности были привлечены такие поляриметрические характеристики, как степень деполаризации, пьедестальная высота, радарный вегетационный индекс и др. На рис. 3, а представлен фрагмент изображения интенсивности радиолокационного отклика территории исследования (те-

стового участка № 2) с лесным массивом Байкало-Кударинского лесничества. Тон изображения изменяется по мере увеличения интенсивности отраженного сигнала от более темных оттенков (незамерзшие участки воды, ровные участки почвы и т. п.) к более светлым (растительность, лед и т. п.).

На рис. 3, б представлены гистограммы распределения радарного вегетационного индекса rvi (аналог вегетационного индекса в оптическом диапазоне), представляющего соотношение радарного отклика на поперечной и согласованной поляризациях. На каждой кривой отчетливо видны три пика, соответствующие водной поверхности, почвенному и растительному покровам. При смене сезонов происходят значительные изменения, как положения пиков, так и их формы. В том числе для растительности в зимний период характерно уменьшение среднего значения rvi (сдвиг пика влево) и разброса значений (более компактная форма пика). При замерзании воды rvi уменьшается почти до 0, в то время как интенсивность отраженного сигнала возрастает.

Для отдельных участков соснового леса Байкало-Кударинского лесничества также была проведена количественная оценка локальных сезонных изменений основных компонент рассеяния. Декомпозиция матрицы рассеяния на составляющие выполнена методом Фримана [23]. На рис. 3, в представлен горизонтальный профиль трех компо-

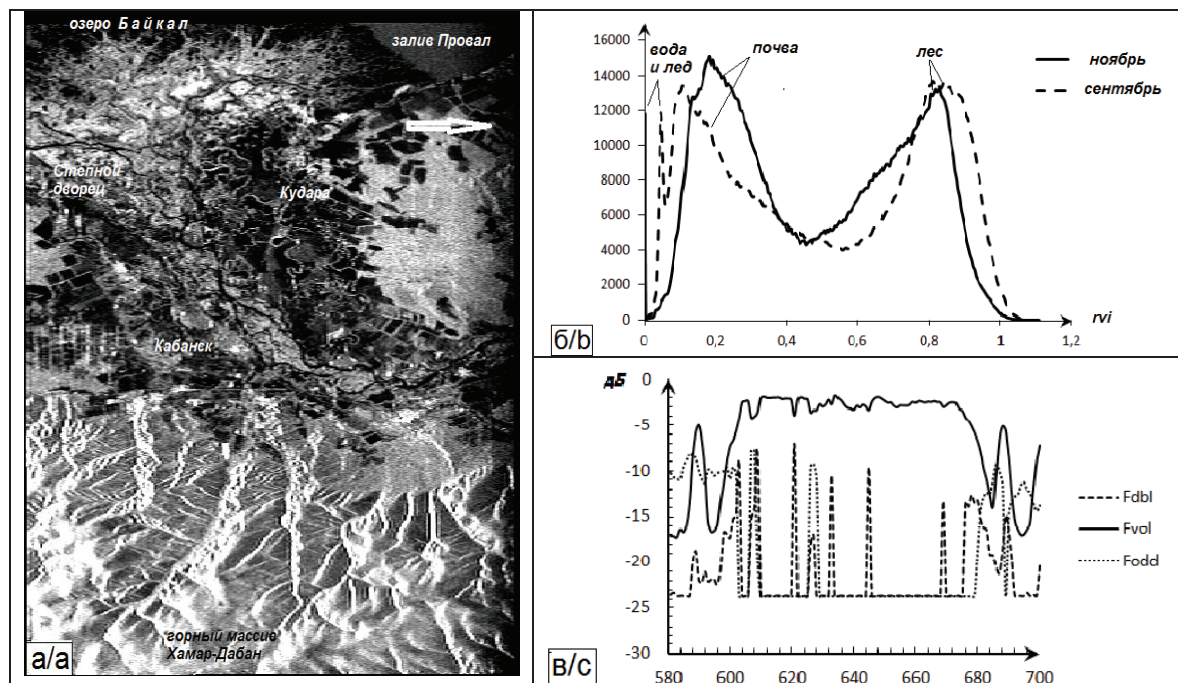


Рис. 3. Радиолокационная поляриметрия тестового участка № 2 по данным ALOS PALSAR от 28 сентября и 13 ноября 2006 г.: а) изображение интенсивности на 28 сентября; б) изменения радарного вегетационного индекса rvi ; в) горизонтальный профиль компонент разложения Фримана F_{dbi} , F_{vol} и F_{odd} на 28 сентября

Fig. 3. Radar polarimetry of test site № 2 by the ALOS PALSAR data on 28 September and 13 November 2006: а) intensity image on 28 September; б) changes of radar vegetation index rvi ; в) horizontal profile of Freeman decomposition components F_{dbi} , F_{vol} and F_{odd} on September 28

нент разложения Фримана, соответствующих объемному F_{vol} , нечетному F_{odd} (преимущественно поверхностному) и четному F_{dbl} (преимущественно двукратному отражению типа почва-ствол или ствол-почва) механизмам рассеяния на участке, отмеченном на рис. 3, *a* белой стрелкой. Для лесного массива свойственно преобладание объемной составляющей F_{vol} (сплошная линия) в центральной части рисунка. При густом плотно сомкнутом лесном пологом две другие составляющие, F_{odd} и F_{dbl} , почти отсутствуют. На участках с редкой растительностью пики поверхностной составляющей F_{odd} встречаются чаще (лесные прогалины и полянки), в то время как объемная компонента F_{vol} немного уменьшается. При больших размерах участков без растительности компонента рассеяния от поверхности начинает преобладать: $F_{odd} > F_{vol}$. Частота и высота пиков двукратной составляющей F_{dbl} зависят от плотности древостоя и толщины стволов деревьев. В среднем по тестовому участку соснового леса осенне-зимнее снижение компонента Фримана составило: $3,48 \pm 0,15$ дБ для F_{vol} ; $3,00 \pm 0,58$ дБ для F_{dbl} ; $0,28 \pm 0,85$ дБ для F_{odd} с доверительной вероятностью 0,95. Таким образом, полагая, что наземная биомасса в сосновом лесу остается неизменной за короткий промежуток времени в 40 суток между съемками, уменьшение в зимний период объемной составляющей F_{vol} в радиолокационном отклике в значительной степени связано с изменениями диэлектрической проницаемости и проводящих свойств лесной среды при снижении температуры до отрицательных значений и установлении снежного покрова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Развитие методологии спутникового мониторинга наземных экосистем: основные результаты последнего десятилетия и перспективные направления исследований / С.А. Барталев, А.С. Исаев, Д.В. Ершов, Е.А. Лупян // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сборник тезисов X Всероссийской открытой конференции. – М., 2012. – С. 3.
2. Паничкин В.Ю., Мирошниченко О.Л. Повышение эффективности гидрогеологических исследований в Казахстане на основе применения новейших информационных технологий // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 1. – С. 118–126.
3. Manual of remote sensing. V. 2. Principles and applications of imaging radar. Editor-in-chief R.A. Ryerson. – USA: John Wiley & Sons Inc., 1998. – 865 p.
4. Захаров А.И., Чимитдоржиев Т.Н. Зондирование земных покровов радаром с синтезированной апертурой // Журнал радиоэлектроники. – 2010. – № 10. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct10/4> (дата обращения: 29.10.2015).
5. Кантемиров Ю.И. Обзор современных радарных данных ДЗЗ // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 2. – С. 69–72.
6. Брыксин В.М., Филатов А.В., Евтюшкин А.В. Использование радарных изображений и DINSAR-PSINSAR-технологии для мониторинга Западной Сибири и Арктики // Журнал радио-

Заключение

В результате проведенных исследований на примере тестовых участков хвойного и смешанного лесов Байкальского региона:

1. Показана возможность дифференциации и отождествления до 16 классов, различающихся особенностями процессов рассеяния радиолокационного импульса для почвенно-растительных покровов на основе поляриметрических радиолокационных данных дециметрового диапазона.
2. Выявлены значительные сезонные вариации процессов рассеяния растительно-почвенных покровов на основе сравнительного анализа одновременных поляриметрических характеристик, таких как радарный вегетационный индекс, степень поляризации и т. д., а также на основе различий в составе и соотношении декомпозиционных компонент разложения Клода-Поттье и Фримана.
3. Установлено ослабление доминирующей роли объемного рассеяния в зимний период и усиление поверхностного рассеяния на радиолокационных изображениях, свидетельствующие о соответствующем изменении вегетативной биомассы.
4. Обнаружено уменьшение объемной и двукратной компонент разложения Фримана в среднем на 3 дБ на тестовом участке соснового леса (в отсутствие значительных потерь биомассы), что свидетельствует об изменениях свойств проводимости лесной среды при отрицательных температурах.

Исследования выполнены при частичной поддержке РФФИ (грант 15-47-04386 р_сибирь_а).

- электроники. – 2012. – № 6. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun12/6> (дата обращения: 29.10.2015).
7. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров / С.А. Барталев, Ф.В. Стыценко, В.А. Егоров, Е.А. Лупян // Лесоведение. – 2015. – № 2. – С. 83–94.
8. Козлов А.Л., Логвинов А.И., Сарычев В.А. Радиолокационная поляриметрия. Поляризационная структура радиолокационных сигналов. – М.: Радиотехника, 2007. – 640 с.
9. Захарова Л.Н., Леонов В.М., Синило В.П. Анализ перспективных технологий радиолокационного зондирования Земли из космоса и путей их использования при решении прикладных задач // Космонавтика и ракетостроение. – 2014. – № 5. – Вып. 78. – С. 16–21.
10. Lee J.-S., Pottier E. Polarimetric radar imaging: from basics to applications. – Boca Raton: CRC Press, 2009. – 422 p.
11. Технология создания и применения базовых продуктов спутниковой радиолокации / А.В. Дмитриев, Т.Н. Чимитдоржиев, И.И. Кирбижекова, П.Н. Дагуров, А.В. Базаров, А.М. Гармаев, К.С. Емельянов, М.А. Гусев // Вычислительные технологии. – 2014. – Т. 19. – № 3. – С. 5–13.
12. Родионова Н.В. Классификация поверхности на поляриметрических РЛИ с использованием текстуры и разложения по механизмам рассеяния // Исследование Земли из космоса. – 2007. – № 4. – С. 8–14.
13. Исследование земных покровов Байкальского региона на основе радарных данных / К. Шмуллиус, Д.Д. Дарижапов,

- Б.Ч. Доржиев, И.И. Кирбижекова, Д.Ш. Ширапов, Н.Н. Ши-
рапова // Сибирский экологический журнал. – № 6. – 2003. –
С. 763–766.
14. Кирбижекова И.И., Батуева Е.В., Дарижапов Д.Д. Поляриме-
трические свойства природных объектов на радарных изобра-
жениях Байкальского региона // Материалы Российской науч-
ной конференции «Зондирование земных покровов радарными с
синтезированной апертурой». – Улан-Удэ, 2010. – С. 85–94.
15. Алексеева М.Н., Прейс Ю.И., Дюкарев Е.А. Пространственная
структура наземного растительного покрова и типа верхнего
слоя торфа северо-восточных отрогов большого Васюганского
болота по дистанционным и наземным данным // Известия
Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. –
№ 4. – С. 81–90.
16. Синёва А.А. Поляризация радиолокация для обнару-
жения и идентификации пленочных загрязнений моря // Труды
Московского физико-технического института. – 2014. – Т. 6. –
№ 3 (23). – С. 129–141.
17. Родионова Н.В. Оценка параметров почвы по радарным дан-
ным с использованием эмпирической модели и декомпозиции
по механизмам рассеяния // Исследование Земли из космоса. –
2009. – № 1. – С. 3–8.
18. Cloude S.R., Pottier E. An entropy-based classification scheme
for land applications of polarimetric SAR // IEEE Trans GRS. –
1997. – V. 35 (1). – P. 68–78.
19. Cloude S.R., Pottier E. A review of target decomposition theo-
rems in radar polarimetry // IEEE Transactions on Geoscience
and Remote Sensing. – 1996. – V. 34. – № 2. – P. 498–518.
20. Van-Zyl J. Unsupervised classification of scattering behavior us-
ing radar polarimetry data // IEEE Trans. GRS. – 1989. –
V. 27. – № 1. – P. 36–45.
21. Unsupervised classification of polarimetric SAR imagery based
on target decomposition and wishart distribution / J.S. Lee,
M.R. Grunes, T.L. Ainsworth, L. Du, D.L. Schuler, S.R. Clou-
de // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. –
1999 – V. 37. – № 5. – P. 2249–2258.
22. Кирбижекова И.И., Батуева Е.В. Н-А- α -классификация дан-
ных ALOS по дельте реки Селенга // Известия вузов. Физи-
ка. – 2010. – Т. 53. – № 9/2. – С. 25–26.
23. Freeman A., Durden S.T. A three-component scattering model for
polarimetric SAR data // IEEE Trans. GRS. – 1998. – V. 36 (3). –
P. 963–973.

Поступила 30.10.2015 г.

Информация об авторах

Кирбижекова И.И., кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник сектора оптико-микроволновой диагностики и обработки космической информации Института физического материаловедения СО РАН.

Батуева Е.В., кандидат физико-математических наук, доцент, ученый секретарь Института физического материаловедения СО РАН.

UDC 537.871.5+530.1:528.871.6

RESEARCH OF SEASONAL CHANGES OF FOREST VEGETATION IN BAIKAL REGION ON POLARIMETRIC ALOS PALSAR DATA

Irina I. Kirbizhekova¹,

kirbizhekova@bk.ru

Elizaveta V. Batueva¹,

elizavlad@ipms.bsnet.ru

¹ Institute of Physical Materials Science of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
6, Sakhyanova Street, Ulan-Ude, 670047, Russia.

Relevance of the work is caused by the necessity to create and to develop the techniques of mapping forest vegetation using satellite radar data.

The main aim of the research is to study the possibility of classifying the coniferous and mixed forests of Baikal region based on polarimetric radar data and seasonal changes of polarimetric properties of vegetation in the decimeter range.

Methods: transformation scattering matrix into a coherent and covariance matrix; polarimetric decomposition by the Claude–Pottier method; two- and three-parameter classification considering zonal distribution of the Claude–Pottier decomposition parameters; Freeman decomposition method to the volumetric, surface and double components of scattering; estimation of a biomass and tree density on the basis of the weights ratio of the components of Freeman decomposition; calculation of polarimetric features such as radar vegetation index, depolarization, etc.; comparative analysis of seasonal polarimetric characteristics.

Results. The authors have studied seasonal changes of the polarimetric radar characteristics of the coniferous and mixed forests in Baikal region based on the autumn-winter data ALOS PALSAR in the decimeter range. Applying the Claude–Pottier and Freeman methods the polarimetric decompositions and classification based on the differences in a composition and a ratio of decomposition components were carried out. The authors revealed the considerable seasonal variations of scattering in vegetable and soil covers. It was ascertained that the dominant role of volume scattering in winter period decreases and surface scattering rises. This fact indicates the corresponding variations of vegetative biomass. On the investigated site of pine forest the authors determined the decrease of the volume and double components of Freeman decomposition on average by 3 dB, which indicates a change in the conductivity properties of the forest medium at the negative temperatures.

Key words:

Radar polarimetry, ALOS PALSAR, polarimetric characteristics, polarimetric decomposition, classification, seasonal change, forest resources.

The research was partially financially supported by the RFBR (Grant 15-47-04386 p_cubup_a).

REFERENCES

- Bartalev S.A., Isaev A.S., Ershov D.V., Lupyan E.A. Razvitie metodologii sputnikovogo monitoringa nazemnykh ekosistem: osnovnye rezultaty poslednego desyatiletia i perspektivnye napravleniya issledovaniy [Development of methodology for satellite monitoring of terrestrial ecosystems: the main results of the last decade and future directions of research]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. Sbornik tezisov Desyatoy vserossiyskoy otkrytoy konferentsii* [Current issues in remote sensing of the Earth from space. Proc. X Int. Russian Conf.]. Moscow, 2012. p. 3.
- Panichkin V.Yu., Miroshnichenko O.L. Increase of efficiency of hydrogeological investigations in Kazakhstan based on application of the newest informational technologies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 1, pp. 118–126. In Rus.
- Manual of remote sensing. Vol. 2. Principles and applications of imaging radar*. Editor-in-chief R.A. Ryerson. USA, John Wiley & Sons Inc., 1998. 865 p.
- Zakharov A.I., Chimitdorzhiev T.N. Zondirovanie zemnykh pokrovov radarami s sintezirovannoy aperturoy [Radar sounding of Earth covers by means of synthetic aperture radar]. *Journal of radio electronics*, 2010, no 10. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/oct10/4/> (accessed 29 October 2015).
- Kantemirov Yu.I. Overview of modern Earth remote sensing radar data. *Izvestiya vuzov «Geodesy and aerophotography»*, 2013, no. 2, pp. 69–72. In Rus.
- Bryksin V.M., Filatov A.V., Evtyushkin A.V. Using of Sar data and DINSAR-PSINSAR technique for monitoring of Western Siberia and Arctic. *Journal of radio electronics*, 2012, no. 6. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/jun12/6/> (accessed 29 October 2015). In Rus.
- Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Egorov V.A., Lupyan E.A. Satellite score destruction of Russian forests from fires. *Russian Journal of Forest Science*, 2015, no. 2, pp. 83–94. In Rus.
- Kozlov A.L., Logvinov A.I., Sarychev V.A. *Radiolokatsionnaya polarimetriya. Polyarizatsionnaya struktura radiolokatsionnykh signalov* [Radar polarimetry. Polarization structure of radar signals]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2007. 640 p.
- Zakharova L.N., Lenov V.M., Sinilo V.P. Analysis of perspective technologies of radar earth sensing from the space and the ways of their use when solving the applied problems. *Cosmonautics and Rocket Engineering*, 2014, no. 5, vol. 78, pp. 16–21. In Rus.
- Lee J.-S., Pottier E. *Polarimetric radar imaging: from basics to applications*. Boca Raton, CRC Press, 2009. 422 p.
- Dmitriev A.V., Chimitdorzhiev T.N., Kirbizhekova I.I., Dugurov P.N., Bazarov A.V., Garmaev A.M., Emelyanov K.S., Gusev M.A. Technologies for design and application of the spaceborne imaging radar basic products. *Computational Technologies*, 2014, vol. 19, no. 3, pp. 5–13. In Rus.
- Rodionova N.V. Classification of surface on polarimetric radar data, using texture and decomposition of scattering mechanisms. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2007, no. 4, pp. 8–14. In Rus.

13. Shmullius K., Darizhapov D.D., Dorzhiev B.Ch., Kirbizhekova I.I., Shirapov D.Sh., Shirapova N.N. Investigation of terrestrial covers of the Baikal region on the basis of radar data. *Contemporary Problems of Ecology*, 2003, no. 6, pp. 763–766. In Rus.
14. Kirbizhekova I.I., Batueva E.V., Darizhapov D.D. Polyarimetricheskie svoystva prirodnykh obektov na radarnykh izobrazheniyakh Baykalskogo regiona [Polarimetric properties of natural objects on radar images of Baikal region]. *Materialy Rossiyskoy nauchnoy konferentsii. Zondirovanie zemnykh pokrovov radarami s sintezirovannoy aperturoy* [Earth cover sensing by radars with synthesized aperture. Proc. of Russian scientific conference]. Ulan-Ude, 2010. pp. 85–94.
15. Alekseeva M.N., Preys Yu.I., Dyukarev E.A. Spatial structure of vegetation cover and top layer of peat of northeastern spurs of the great vasyugan mire by remote and ground data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 81–90. In Rus.
16. Sineva A.A. Polarimetric radars for detection and identification of marine oil pollution. *Proceedings of MIPT*, 2014, vol. 6, no. 3 (23), pp. 129–141. In Rus.
17. Rodionova N.V. Estimation of soil parameters by radar data using the empirical model and decomposition of scattering mechanisms. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, no. 1, pp. 3–8. In Rus.
18. Cloude S.R., E. Pottier. An entropy-based classification scheme for land applications of polarimetric SAR. *IEEE Trans GRS*, 1997, vol. 35 (1), pp. 68–78.
19. Cloude S.R., Pottier E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, vol. 34, no. 2, pp. 498–518.
20. Van-Zyl J. Unsupervised classification of scattering behavior using radar polarimetry data. *IEEE Trans. GRS*, 1989, vol. 27, no. 1, pp. 36–45.
21. Lee J.S., Grunes M.R., Ainsworth T.L., Du L., Schuler D.L., Cloude S.R. Unsupervised classification of polarimetric SAR imagery based on target decomposition and wishart distribution. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, vol. 37, no. 5, pp. 2249–2258.
22. Kirbizhekova I.I., Batueva E.V. H-A- α -classification of ALOS data on the Selenga delta. *Russian Physics Journal*, 2010, vol. 53, no. 9/2, pp. 25–26. In Rus.
23. Freeman A., Durden S.T. A three-component scattering model for polarimetric SAR data. *IEEE Trans. GRS*, 1998, vol. 36 (3), pp. 963–973.

Received: 30 October 2015.

Information about the authors

Irina I. Kirbizhekova, Cand. Sc., associate professor, senior researcher, Physical Institute of Materials Science.

Elizaveta V. Batueva, Cand. Sc., associate professor, scientific secretary, Institute of Physical Materials Science.

УДК 532.5

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА МАЛЫХ РЕК БАСЕЙНА ТОМИ

Вершинина Ирина Павловна,

ipvershinina@rambler.ru

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Актуальность работы состоит в заинтересованности отдельных регионов страны и экономики России в целом в скорейшем внедрении относительно малозатратных при строительстве и последующей эксплуатации, а также экологически менее опасных, чем крупные гидротехнические сооружения, малых- и микрогидроэлектростанций для выработки электроэнергии из потенциальной гидравлической энергии небольших потоков. Новизна исследования заключается в расчёте гидроэнергетического потенциала некоторых малых рек бассейна Томи (реки с площадью водосбора менее 2000 км²), как доказательство реальной возможности стабильной круглогодичной эксплуатации малых и мини-ГЭС в сибирских регионах, сооружённых на малых водотоках.

Цель работы: всестороннее исследование факторов и условий, благоприятно и негативно влияющих на возможность использования гидроэнергетического потенциала небольших поверхностных водотоков, расположенных на территории Западной Сибири, на примере расчёта энергетического потенциала малых притоков Томи, как источников постоянно возобновляемой гидравлической энергии.

Методы исследования: сравнительно-географический при оценке гидроморфологических характеристик рек, математический при расчёте среднего многолетнего годового стока исследуемых водотоков и их потенциальной энергетической мощности, аналитический и обобщающий при выполнении выводов.

Результаты. Выявлено, что территория бассейна Томи по географо-гидрологическим характеристикам имеет отдельные, наиболее перспективные участки для успешного развития малой энергетики. Расчётами подтверждена реальная возможность стабильного всесезонного использования энергетического потенциала некрупных водотоков на сибирской территории. Повсеместное строительство малых гидроэлектростанций, в отличие от их широкого применения в развитых зарубежных странах, в России сдерживается слабой законодательной базой в области использования альтернативных источников энергии.

Ключевые слова:

Расход воды, возобновляемые источники энергии, малые реки, гидроэнергетический потенциал, малая гидроэнергетика.

Введение

Прогресс цивилизации неразрывно связан с потребностью общества в бесперебойной работе электрических приборов, человечество постоянно нуждается в электроэнергии, и объёмы её потребления ежегодно возрастают.

В сложившихся социально-экономических и природных условиях: уменьшения запасов невозобновляемых энергоресурсов (нефть, газ, уголь); увеличения негативных экологических последствий развития крупной энергетики при сохранении традиционной структуры топливно-энергетического баланса (ТЭБ), преобладании загрязняющих видов топлива, применение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) может значительно облегчить ресурсную и экологическую напряжённость в отдельном регионе и мире.

Во многих передовых странах (США, Китае, Японии, Германии) с 70-х гг. XX века стали переориентировать традиционные технологии на выработку энергии из нетрадиционных источников (биомассы, отходов производства животноводства, солнечной, ветровой и гидравлической энергии, причём строительства преимущественно малых и мини-ГЭС). Начиная с 2015 г. себестоимость электроэнергии, полученной за счёт ВИЭ, станет меньше себестоимости электроэнергии, вырабатываемой из невозобновляемых ресурсов [1].

В Германии реализуется проект Energiewende, в результате реализации которого предполагается,

что доля возобновляемых источников энергии в энергобалансе страны должна вырасти при одновременном прекращении использования ядерной энергетики и ископаемых источников до 80 % от общего производства и до 60 % от общего потребления к 2050 г. [2].

Одним из основных стратегических документов, определяющих общеевропейскую политику на текущем этапе, является стратегия «20-20-20». Название стратегии расшифровывается так: к 2020 г. уровень выбросов углекислого газа в атмосферу, по сравнению с уровнем 1999 г., должен сократиться на 20 %, доля энергии из возобновляемых источников в общей структуре энергопотребления – вырасти на 20 %, а общие затраты энергетики – сократиться на 20 %. В некоторых странах Европы (Германии и Скандинавии) такие показатели уже выше [3].

Потребление энергии на основе ВИЭ, по данным за 2012 г., в США составляет 21,4 % от мирового потребления, в Китае – 13,4 %, Германии – 10,9 %. В России значение показателя потребления энергии на основе ВИЭ составляет всего 0,1 % от общемирового показателя [4].

«Многочисленные преимущества малой гидроэнергетики: относительно низкий уровень инвестиционного капитала, немногочисленные строительные работы, упрощённое содержание и эксплуатация, минимальное воздействие на окружающую среду, пригодность для развития малых ги-

дрозлектростанций, размещённых вразброс в сельских и отдаленных районах, – привлекли особое внимания со стороны мирового сообщества. Малая гидроэнергетика быстро развивается во многих странах, внося важный вклад в удовлетворение ежедневного спроса на электроэнергию, снижение уровня бедности и улучшение социально-экономической ситуации.

Китайское правительство уделяет приоритетное внимание разработке и использованию гидроэнергетики, а также другим возобновляемым источникам энергии. После многих лет усилий установленная гидроэнергетическая мощность Китая составляет 249 ГВт, обеспечивая стране мировое первенство в данной области. Значительную часть указанной мощности составляет малая гидроэнергетика. В стране установлено 45 000 станций с годовой производительностью и установленной мощностью 65 ГВт, что составляет 27 % установленной гидроэнергетической мощности в стране и 25 % производимой электроэнергии» [5, с. 3].

В отдельных странах достигнуто предельно максимальное использование доступного гидроэнергетического потенциала: в Италии, Франции, Швейцарии – 96–98 %, в Германии – 86 %; в США – 82 %; в Японии – 90 % [6].

В России с начала XX века развитие гидроэнергетики направлено на строительство крупных гидроэлектростанций (ГЭС). К 1932 г., согласно плану, Государственной комиссией по электрификации России (ГОЭЛРО) введены в эксплуатацию 32 крупных ГЭС. К 1950 г. в СССР насчитывалось 6500 малых и микроГЭС. В дальнейшем государство поддерживало строительство только гигантских энергетических объектов. К 2000 г. страна получала энергию от таких крупных ГЭС, как Братская – 4,5 млн кВт, Красноярская – 6 млн кВт, Саяно-Шушенская – 6,4 млн кВт, и др. [7]. На этом фоне малая гидроэнергетика (МГЭ) отошла на второй план. Производственный потенциал электроэнергетической отрасли России к началу третьего тысячелетия составлял более 700 электростанций с общей установленной мощностью свыше 215 млн кВт, из которых около 70 % – тепловые электростанции, 20 % – гидравлические и 10 % – атомные [8].

В последнее время, по ряду социально-экономических и экологических причин, интерес к развитию малых и мини-ГЭС снова возрос, особенно после аварии на Саяно-Шушенской ГЭС 17 августа 2009 г., которая привела не только к разрушению материальных объектов и природно-техногенных комплексов, но и к гибели 75 человек. Малая гидроэнергетика экологически более безопасна и не способна привести к таким трагическим авариям.

Физико-географическая характеристика территории исследования

Бассейн реки Томи преимущественно расположен в Кузнецко-Салаирской горной области гор

Южной Сибири и поэтому имеет сложное орографическое строение. Более 2/3 площади бассейна занято горами (Кузнецкий Алатау, Горная Шория, Салаирский кряж, Тарадановский кряж), которые окаймляют Кузнецкую котловину. Кузнецкий Алатау составлен группой разноориентированных с неправильными очертаниями отдельных хребтов, гряд и массивов, ограниченных разломами, возникших в результате действия неотектонических процессов и эрозии ветра. С юга на север высота вершин хребтов Кузнецкого Алатау постепенно уменьшается от более чем 2000 м (безымянная вершина на хребте Кара-Таш – 2217 м) до 1871 м в бассейнах рек Верхняя и Средняя Терсь и до 1450 м в истоках реки Нижняя Терсь (гора Большой Таскыл – 1448 м), а у северной окраины опускается до 200–300 м на Томь-Яйском междуречье.

Рельеф Горной Шории, возвышенного плато, меняется от среднегорного с абсолютными отметками водоразделов 900–1200 м до низкорного, расчленённого глубокими руслами рек, водоразделы которых находятся на высоте 600–700 м.

Салаирский кряж представляет собой невысокую возвышенность с волнистым равнинным рельефом, сильно расчленённую эрозией. Средняя абсолютная высота кряжа не превышает 420–450 м, при выходе на Западно-Сибирскую равнину высоты Обь-Томского междуречья доходят до 130 м [9, 10].

Кузнецкая котловина – это межгорная впадина с всхолмленной поверхностью, расчленённой сетью рек. Равнинный характер внутренних частей её нарушается рядом горных кряжей (Тарадановский увал, Салтымаковский кряж, Караканские горы и др.). Средние высоты составляют около 450 м на юге и 250 м на севере. Густая сеть речных долин и балок придаёт поверхности котловины увалисто-холмистый характер [11].

Общая протяженность реки Томи составляет 827 км, в неё впадает 26 064 самых малых и малых рек (длиной от менее 10 до 100 км). Уклон водной поверхности рек изменяется от 12,0 ‰ в верховьях до 1,0 ‰ в низовьях [12].

По характеру водного режима притоки Томи относят к рекам алтайского типа с весенним (р. Ускат – с. Красулино и р. Лебяжья – с. Безменово) и весенне-летним половодьем и паводками в тёплое время года. Сток весеннего половодья составляет 65–90 % от годового, в летне-осенней период – от 5 до 25 %, на зимний сток приходится не более 10 % от годового. Максимальные расходы и уровни воды отмечают в половодье.

Начало половодья приходится на конец апреля – начало мая. Основным источником питания рек в период половодья являются талые твёрдые осадки, аккумулируемые на водосборе в зимний период, которые формируют 55–75 % годового стока. Увеличение слоя стока и периода половодья происходит за счёт выпадения на спаде половодья жидких атмосферных осадков. После прохождения половодья, в мае–июне, на всех реках устана-

вливаются летне-осенний период, в котором часто наблюдаются дождевые паводки. Наименьшие расходы за летне-осенний период наблюдаются в августе-сентябре.

Водный режим рек в период зимней межени, продолжительность которой доходит до 190 суток, тесно связан с ледовым режимом рек и динамикой грунтовых вод. Наименьшие расходы и уровни воды, как правило, наблюдаются в конце зимней межени.

Средний многолетний годовой модуль стока уменьшается с юга на север бассейна Томи от 20 до 5 л/(с·км²) и с востока на запад от 40 до 5 л/(с·км²) [13].

Годовой сток сильно меняется год от года. Колебания стока носят циклический характер с преобладанием циклов 10–12-летней продолжительности. Коэффициенты вариации стока уменьшаются с севера на юг и с запада на восток от 0,50 до 0,15.

Внутригодовое распределение стока на реках бассейна р. Томи характеризуется максимальным стоком в период весеннего половодья, в апреле-мае. В сентябре-октябре практически на всех реках бассейна р. Томи наблюдается увеличение стока, связанное с выпадением осадков.

Возможности создания и/или использования геометрического напора воды (ΔH) для выработки энергии зависят от перепадов высот, то есть рельефа местности, определяющего продольные уклоны рек на разных их участках. Реки имеют изломанную форму продольного профиля. Выпуклости продольного профиля обычно приурочены к участкам, где река пересекает поднимающиеся тектонические структуры [11]. Уклоны малых рек высокие.

Расчёт гидроэнергетического потенциала малых рек в бассейне Томи

Энергия потока рек в естественном состоянии расходуется на преодоление сил трения между частицами воды внутри самого потока и между потоком и его ложем. Внешне работа рек проявляется в размывах русел, переносе взвешенных наносов и перекачивании по дну частиц гравия, гальки, камней.

На любом исследуемом участке реки работа водного потока определяется действием силы тяжести, точнее её проекцией по направлению движения, следовательно, совершаемая водой работа определяется разностью уровней воды в начале и конце рассматриваемого участка реки. При разности уровней ΔH (м), длине участка L (м) и среднем на выбранном участке реки расходе воды Q (м³/с) мощность водотока N (Вт) рассчитывается по следующим формулам [9]:

$$N = \rho \cdot g \cdot Q \cdot \Delta H = 9810 \cdot Q \cdot \Delta H, \quad (1)$$

где N – мощность водотока, кВт; ρ – плотность воды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с², или

$$N = 3,81 \cdot Q \cdot \Delta H. \quad (2)$$

За расчётный промежуток времени (τ , с) работа (A , кВт ч), совершаемая водотоком, определяется по формуле

$$A = \Theta = \frac{9,81 \cdot Q \cdot \Delta H \cdot \tau}{3600} = \frac{W \cdot \Delta H}{367}, \quad (3)$$

где $W = Q \cdot \tau$ – объём стока за определённый временной интервал, м³.

При расчёте полезной мощности и выработки электроэнергии в формулах (1)–(3) учитывают коэффициент полезного действия η , который представляет собой отношение отдаваемой и приводимой мощностей.

По формуле (2) рассчитываются теоретически возможные потенциальные гидроресурсы, которые могут быть использованы для нужд энергетики.

Реализовать весь гидроэнергетический потенциал водотока нет возможности, так как происходят неизбежные потери расходов воды (на испарение, фильтрацию, забор воды на хозяйственные нужды и т. д.) и изменения напоров, а также потери энергии в электромеханическом оборудовании [9].

Гидроэнергетический потенциал с экономической точки зрения зависит от многих факторов: степени изученности рек, научно-технического прогресса в энергетике, изменения структуры энергетического баланса территории, конъюнктуры энергоносителей, потребностей рынка в условиях свободной конкуренции и других.

Теоретический потенциал малой энергетики России оценивался в 1520 млрд кВт·ч (30 % от общего потенциала водных ресурсов страны) [10]. При этом экономически целесообразная часть составила бы 493 млрд кВт·ч. В 90-х годах XX века предполагалось довести установленную мощность МГЭС к 2000 г. до 3000 МВт с выработкой более 12 млрд кВт·ч в год, что могло бы дать экономии более 4 млн т органического топлива (в пересчёте на условное топливо). Как следствие – уменьшение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

В качестве оценки гидроэнергетического потенциала малых рек в бассейне Томи рассмотрим:

- 1) факторы, определяющие гидроэнергетический потенциал: возможности создания напора (по характеристикам рельефа местности и продольным профилям потоков), водность (расходы воды) рек с распределением по сезонам и месяцам, уклоны свободной поверхности и скорость течения;
- 2) условия, способствующие использованию гидроэнергетического потенциала (большие перепады отметок местности, высокая водность и скорости течения в период половодья);
- 3) определение причин, мешающих освоению гидроэнергетических ресурсов рассматриваемой территории (низкая водность, скорость течения в меженьные периоды, ледовые явления, лесные заломы, влекомые наносы).

Таблица. Показатели потенциальной мощности и энергии некоторых малых рек бассейна Томи

Table. Indicators of potential power and energy of some small rivers of the Tom basin

| Река – створ River – section line | Длина реки L , км Length of river L , km | Уклон водной поверхности / % Water surface slope, / % | Перепад высот ΔH , м Height difference ΔH , m | Средний многолетний годовой расход воды Q , м ³ /с Average long-term annual water flow rate Q , m ³ /s | Потенциальная мощность N Potential power N | | Энергия потока \mathcal{E} , 10 ⁶ кВт·ч/г Stream energy \mathcal{E} , 10 ⁶ kWh/year |
|--|---|--|--|---|---|-----------------|--|
| | | | | | кВт/км kW/km | кВт/км kW/km | |
| р. Тельбес – Тельбесский рудник Telbes River (Telbessky mine) | 71 | 16 | 1136 | 25,1 | 139859 | 1969,8 | 1226,0 |
| р. Ускат – с. Красулино Uskat River (Krasulino) | 22 | 2,80 | 61,6 | 4,79 | 1447 | 65,8 | 12,7 |
| р. Амзас – с. Амзас Amzas River (Amzas) | 24 | 10 | 240 | 3,76 | 4426 | 184,4 | 38,8 |
| р. Южная Уньга – с. Панфиловское South Unga River (Panfilivskoe) | 54 | 2,62 | 141 | 4,14 | 2863 | 53 | 25,1 |
| р. Северная Уньга – с. Панфиловское North Unga River (Panfilivskoe) | 72 | 2,09 | 149 | 3,23 | 2361 | 32,8 | 20,7 |
| р. Тутуяс – п. Тутуяс Tutuas River (Tutuas) | 74 | 8,16 | 604 | 17,0 | 50365 | 680,6 | 441,5 |
| р. Тайдон – п. Медвежка Taidon River (Medvezhka) | 61 | 4,20 | 256 | 48,0 | 60273 | 988,1 | 528,3 |

Для рек бассейна Томи характерным является высокое значение уклонов и водной поверхности во все фазы водного режима, как в многоводные, так и в маловодные годы. На спаде половодья уклоны существенно снижаются, оставаясь при этом достаточно высокими для производства электроэнергии.

Подобный внутригодовой режим уклонов водной поверхности, наличие вертикальной и горизонтальной расчленённости речных долин являются благоприятными факторами для применения деривационных ГЭС и микроГЭС.

Наивысших значений средние и максимальные скорости воды достигают в половодье и могут составлять 3,5–4,2 м/с. В летне-осеннюю межень скорости воды существенно снижаются до 0,5–0,9 м/с. При этом максимальные скорости в 1,3–1,5 раза превышают средние скорости.

Сток донных (влекомых) наносов составляют около 10–30 % от стока взвешенных. По оценкам [14], р. Томь у Томска переносит за год от 200 тыс. до 1000000 м³ донных наносов. Наличие наносов в речном потоке приводит к быстрому истиранию лопаток турбин гидроэнергетических установок, что необходимо учитывать при определении периода эксплуатации ГЭС.

Для оценки энергонасыщенности реки используют километрическую мощность N_k (кВт/км). На основе фондовых материалов [15] в таблице представлен среднемноголетний годовой сток малых рек бассейна Томи и по формулам (2) и (3) определены показатели мощности потоков.

Наибольшей энергией обладают потоки, формирующиеся на западных склонах Кузнецкого Алатау: р. Тутуяс (442·10⁶ кВт·ч/год), р. Тайдон (528·10⁶ кВт·ч/год), а также в Горной Шории – р. Тельбес (1226·10⁶ кВт·ч/год), что легко объяс-

няется значительным перепадом высот ΔH , м и водности потоков. В современном мире для малой гидроэнергетики рекомендуется использовать поперечно-струйные или двукратные гидротурбины.

Максимальный коэффициент полезного действия таких турбин составляет 90 %, они надёжны в эксплуатации, имеют относительно простую конструкцию и сравнительно низкую себестоимость. В соответствии с их эксплуатационными характеристиками турбины могут эксплуатироваться при напорах от 1 метра с получением при этом мощности порядка 6–8 кВт при наличии достаточных расходов воды.

Главный положительный эффект малой гидроэнергетики заключается в том, что она даёт возможность удовлетворить потребности человека при минимальном воздействии на окружающую среду [16]. Это особенно важно, учитывая неблагоприятное экологическое состояние малых рек Сибири. Выделяют следующие аспекты, обеспечивающие высокую экологическую и социальную эффективность малых ГЭС:

- небольшие площади затопления и подтопления земель;
- простота подготовки ложа к затоплению;
- мелководные и небольшие по объёму водохранилища малых ГЭС не препятствуют процессам водообмена, способствуют перемешиванию вод и их аэрации;
- несущественная степень нарушения окружающей среды;
- минимальный вред рыбному поголовью;
- заполнение малых водохранилищ не провоцирует землетрясения;
- проще обеспечить безопасную эксплуатацию малых ГЭС, разрушения их плотин не столь опасны, как плотин крупных ГЭС, даже в случае террористических актов;

- малые ГЭС экономически выгодны в обслуживании и ремонте.

Приведенные в таблице расчётные значения характеристик энергетического потенциала отдельных рек бассейна Томи свидетельствуют о том, что их энергетический потенциал весьма высок для развития малой и микрогидроэнергетики.

Географически наиболее перспективными территориями для развития гидроэнергетики являются локальные участки с относительно более высокими уклонами рек, где обеспечиваются достаточный напор и скорости течения в близком расположении от населённых пунктов, чтобы минимизировать потери электроэнергии на пути к потребителю. Такой вывод касается всех типов компоновки гидроэнергетических установок.

В отношении распределения гидрологических и гидравлических характеристик потоков во времени (по сезонам и месяцам) наиболее благоприятным является тёплый период года, особенно весенне-летнее половодье, когда возможности выработки гидроэнергии максимальные. Зимой гидроэнергетический потенциал наименьший в связи с низкими расходами воды в зимнюю межень и ледовыми явлениями (ледостав зимой, наледи, наличие льда и шуги в потоках во время замерзания и вскрытия рек). Вопрос о возможности эффективно вырабатывать гидроэнергию на малых реках в целом и особенно в зимний период года решается после тщательного всестороннего изучения конкретного проекта.

В России до 2015 г. планировалось ввести в эксплуатацию 65 малых гидроэлектростанций (18 – на территории Республики Тыва, 35 – в Республике Алтай, 12 – в Бурятии). Разработана концепция развития и схема размещения объектов малой гидроэнергетики для этих республик. Уже построены две станции и ведётся строительство ещё трёх. МикроГЭС в Тыве построена в 1995 г. на курорте Уш-Белдир, в 2001 г. введена в строй микроГЭС «Кызыл-Хая» [17]. Повсеместное строительство МГЭС сдерживается слабой законодательной базой в области использования ВИЭ.

В перспективные планы стратегического развития энергетики страны, отдельных субъектов Федерации и различных энергосберегающих компаний до 2020–30 гг. включены реконструкция старых и строительство новых малых ГЭС. «В соответствии с Основными направлениями государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 года целевым ориентиром на указанный период является увеличение относительного объема производства и потребления электрической энергии с использованием возобновляемых источников энергии (кроме гидроэлектростанций установленной мощностью более 25 МВт) примерно с 0,5 до 4,5 %. Для достижения намеченных объемов производства электроэнер-

гии на базе возобновляемых источников энергии необходимо уже в указанный период обеспечить ввод генерирующих объектов (малых гидроэлектростанций, ветроэлектрических станций, приливных электростанций, геотермальных электростанций, тепловых электростанций, использующих биомассу в качестве одного из топлив, прочих видов электроустановок) с суммарной установленной мощностью до 25 ГВт» [18, с. 74]. Малая гидроэнергетика в отдельных регионах способствует обеспечению экологической безопасности функционирования энергетического сектора и уменьшению негативного влияния на окружающую среду. Необходима законодательная база для её успешного развития.

В настоящее время в стране официально приняты только Рекомендации [19], которые содержат характеристики нетрадиционной и малой энергетики. Закон «О возобновляемых источниках энергии» находится в стадии обсуждения проекта, разработанного представителями РАО ЕЭС России, ОАО ГидроОКГ в рамках реализации Программы подготовки нормативных и регламентирующих документов. Отсутствие подобного закона препятствует реализации проектов создания сооружений, вырабатывающих электрическую энергию из возобновляемых источников [20].

Законодатели отдельных субъектов Федерации на местном уровне принимают законы, регулирующие применение ВИЭ и определяющие особенности местной энергосберегающей деятельности для беспрепятственного развития нетрадиционной энергетики в регионе. Например, закон Алтайского края «Об энергосбережении, повышении эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в Алтайском крае» (принят Постановлением № 5 Алтайского краевого совета народных депутатов от 3 января 2001 г.).

В Удмуртской Республике принята в ноябре 2013 г. государственная программа «Энергоэффективность и развитие энергетики в Удмуртской Республике (2014–2020 гг.)». Программа направлена на повышение эффективности использования возобновляемых источников энергии. С совокупным объемом финансирования в 2014 г. около 140 млн руб. и к 2020 г. более 300 млн руб. Программа учитывает показатели только производства электрической энергии и не рассматривает выработку тепловой энергии [21].

Выводы

Успешное развитие малой гидроэнергетики в бассейне Томи возможно на основе следующих установленных фактов:

1. Климатические условия сибирского региона, гидрографические характеристики малых водотоков и их гидроэнергетический потенциал являются основой стабильного, ежегодно возобновляемого источника гидравлической энергии.

2. Наличие современного производства экономически выгодных и экологически безопасных современных малых и микроГЭС.
3. Ориентированность экономики страны, энергетической стратегии развития на максимальное использование ВИЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышев А.В. Стимулирование использования возобновляемых источников энергии и факторы, препятствующие развитию нетрадиционной энергетики в России // Известия Санкт-Петербургского университета экономики и финансов. – 2013. – № 5 (83) – С. 160–164. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/stimulirovanie-ispolzovaniya-vozobnovlyaemykh-istochnikov-energii-i-faktory-prepyatstvuyushchie-razvitiyu-netraditsionnoy-energetiki> (дата обращения: 29.12.2015).
2. Германия. 74 % энергии из возобновляемых источников. URL: <http://www.vestifinance.ru/articles/42870> (дата обращения: 29.12.2015).
3. Айязгулова И. Германия избавляется от атома. URL: <http://www.gazeta.ru/business/2014/05/16/6037129.shtml>. (дата обращения: 29.12.2015).
4. BP Statistical Review of World Energy. 2013. URL: <http://www.bp.com/statisticalreview> (дата обращения: 29.12.2015).
5. International Center on Small Hydro Power (ICSHP). 2015. URL: http://www.smallhydroworld.org/fileadmin/user_upload/pdf/WSHPDR_2013_Executive_Summary_Russian.pdf. – С. 3 (дата обращения: 29.12.2015).
6. IEA World Energy Investment Outlook. International Energy Agency. Special Report. OECD/IEA. Paris. 2015. URL: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2015Special_Reporton_Energy_and_Climate_Change.pdf (дата обращения: 29.12.2015).
7. Субботин А.С., Хаустов В.А. Гидротехника и мелиорация. – СПб.: РГТУ, 2006. URL: <http://hva.rshu.ru/ob/gidroteh/uch/titul.htm> (дата обращения: 29.12.2015).
8. Суржикова О.А. Состояние российской электроэнергетики // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 4. – С. 140–143. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-rossiyskoy-elektroenergetiki> (дата обращения: 29.12.2015).
9. Мезенцев А.В., Вершинина И.П. Потенциальные гидроэнергетические ресурсы Кемеровской области // Природные ресурсы Сибири. Современное состояние и проблемы природопользования: сборник материалов. – Новосибирск: Наука, 2010. – С. 11–24.
10. Садовский С.И. Пути развития малой гидроэнергетики России // Гидротехническое строительство. – 1997. – № 9. – С. 1–3.
11. География. Современная иллюстрированная энциклопедия / под ред. проф. А.П. Горкина. – М.: Росмэн, 2006. URL: http://dic.academic.ru/searchall.php?SWord=%D0%9A%D1%83%D0%B7%D0%BD%D0%B5%D1%86%D0%BA%D0%B0%D1%8F+%D0%BA%D0%BE%D1%82%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%BD%D0%B0&from=xx&to=ru&did=enc_geo&stype= (дата обращения: 29.12.2015).
12. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики (за 1971–1975 гг.). Верхняя и Средняя Обь / под ред. Е.П. Шурупа. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979. – Т. 15. – Вып. 2. – С. 124–133.
13. Вершинина И.П. Характеристика годового стока рек Кузбасса // Вестник Томского государственного университета. – 2008. – № 316. – С. 201–205.
14. Русловые и пойменные процессы рек Сибири // В.А. Земцов, Д.А. Вершинин, А.О. Крутовский, Ю.И. Каменсков. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. – 182 с.
15. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Разд. 1. Сер. 2. Ч. 1. Т. 1. Вып. 10. 1978–2005 гг. – Новосибирск: ГклоГМиКПС, Зап.-Сиб. УГМиКПС, 1979–2007.
16. Малик Л.К. ГЭС на малых реках России: достоинства и недостатки // Природа. – 2003. – № 1. – С. 55–62.
17. ЭнергоСвет // Портал по энергосбережению. URL: <http://www.energosoвет.ru/entech.php?idd=36> (дата обращения: 29.12.2015).
18. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года: утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р. – С. 74 // Портал Infobio. URL: <http://www.infobio.ru/sites/default/files/Energostrategiya-2030.pdf> (дата обращения: 29.12.2015).
19. Нетрадиционная энергетика. Гидроэнергетика малая. Гидроэлектростанции малой мощности передвижные. Типы и основные параметры. Р 50-605-88-94 (текст документа по состоянию на июль 2011 г.): утверждены Приказом ВНИИСтандарта от 10 июня 1994 г. № 29. Дата введения 1 января 1995 года // Информационно-правовой портал BestPravo. URL: <http://www.bestpravo.ru/rossijskoje/pt-zakony/19o.htm> (дата обращения: 29.12.2015).
20. Ларин В.И. Состояние и перспективы применения возобновляемых источников энергии в России. Характеристика возобновляемой энергетики в регионах Российской Федерации: Мурманской области, Ярославской области, Республике Алтай и Алтайском крае. Некоторые рекомендации. – М.: Lead, 2006. – С. 50–53.
21. Сергеев Н.Н. Основные направления использования возобновляемых источников энергии в Удмуртской Республике // Вестник Удмуртского университета. Экономика и право. – 2014. – Вып. 2. – С. 92–96. URL: http://ru.vestnik.udsu.ru/files/originsl_articles/vuu_14_022_12.pdf (дата обращения: 29.12.2015).

Поступила 29.12.2015 г.

Информация об авторах

Вершинина И.П., старший преподаватель кафедры природопользования геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDC 532.5

EVALUATION OF ENERGY POTENTIAL OF SMALL RIVERS OF THE TOM

Irina P. Vershinina,

ipvershinina@rambler.ru

National Research Tomsk State University,
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is in the interest of certain regions of the country and the Russian economy as a whole in rapid implementation of small and micro hydropower, relatively low cost in construction and subsequent operation and environmentally less hazardous than larger waterworks, to generate electricity from the potential hydraulic energy of small streams. The novelty of the research lies in calculation of hydropower potential of small rivers of the basin of the Tom (rivers with a catchment area less than 2000 km²) as a proof of real possibility of a stable year-round operation of small and mini hydroelectric power stations in Siberian regions, erected on small watercourses.

The main aim of the research is to study comprehensively the factors and conditions which have favorable and negative impact on use of hydropower potential of small surface water bodies located in the territory of Western Siberia, by the example of calculation of energy potential of small tributaries of the Tom as a constantly renewable source of hydraulic power.

The methods used in the study: comparative geography when evaluating hydro-morphological characteristics of rivers, mathematics in calculating long-term average annual flow of watercourses studied and their potential energy capacity, analysis and synthesis in the findings.

The results. The author has found out that the area of the Tom basin has certain promising areas for successful development of small power by geographical and hydrological characteristics. The calculations confirmed a real possibility of a stable year-round use of the energy potential of medium-sized watercourses in Siberia. The widespread construction of small hydro power plants, in contrast to their widespread use in the developed foreign countries, is constrained in Russia by a weak legal framework in the field of application of the alternative energy sources.

Key words:

Water consumption, renewable energy sources, small rivers, hydropower potential, small hydropower.

REFERENCES

- Chernyshev A.V. Promote the use of renewable energy sources and the factors impeding the development of non-traditional Energy in Russia. *Bulletin of the St. Petersburg University of Economics and Finance*, 2013, no. 5 (83), pp. 160–164. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/stimulirovanie-ispolzovaniya-vozobnovlyayemyh-istochnikov-energii-i-factory-prepyatstvuyushchie-razvitiyu-netraditsionnoy-energetiki> (accessed 29 December 2015). In Rus.
- Germaniya. 74 % energii iz vozobnovlyayemykh istochnikov [Germany. 74 % of energy from renewable sources]. Available at: <http://www.vestifinance.ru/articles/42870> (accessed 29 December 2015).
- Azyzagulova I. Germaniya izbavlyayetsya ot atoma [Germany gets rid of atom]. Available at: <http://www.gazeta.ru/business/2014/05/16/6037129.shtml> (accessed 29 December 2015).
- BP Statistical Review of World Energy. 2013. Available at: <http://www.bp.com/statisticalreview> (accessed 29 December 2015).
- International Center on Small Hydro Power (ICSHP). 2015. Available at: http://www.smallhydroworld.org/fileadmin/user_upload/pdf/WSHPDR_2013_Executive_Summary_Russian.pdf, p. 3 (accessed 29 December 2015).
- IEA World Energy Investment Outlook. International Energy Agency. Special Report. OECD/IEA. Paris. 2015. Available at: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WE02015Special_Report_on_Energy_and_Climate_Change.pdf (accessed 29 December 2015).
- Subbotin A.S., Khaustov V.A. *Gidrotekhnika i melioratsiya* [Hydrotechnics and melioration]. Available at: <http://hva.rshu.ru/ob/gidroteh/uch/titul.htm> (accessed 29 December 2015).
- Surzhikova O.A. Status of the Russian power. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 312. no. 4, pp. 140–143. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-rossiyskoy-elektroenergetiki> (accessed 29 December 2015). In Rus.
- Mezentsev A.V., Vershinin I.P. Potentsialnye gidroenergeticheskie resursy Kemerovskoy oblasti [Potential hydropower resources of Kemerovo region]. *Prirodnye resursy Sibiri. Sovremennoe sostoyanie i problem prirodopolzovaniya. Sbornik materialov* [Natural Resources of Siberia. The current state and problems of nature management. The collection of materials]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2010. pp. 11–24.
- Sadovsky S.I. Puti razvitiya maloy gidroenergetiki Rossii [Future development of small hydropower in Russia]. *Hydraulic engineering*, 1997, no. 9, pp. 1–3. In Rus.
- Geografiya. Sovremennaya illyustrirovannaya entsiklopediya [Geography. Modern illustrated encyclopedia]. Ed. by prof. A.P. Gorkina. Available at: http://dic.academic.ru/searchall.php?SWord=%D0%9A%D1%83%D0%B7%D0%BD%D0%B5%D1%86%D0%BA%D0%B0%D1%8F+%D0%BA%D0%BE%D1%82%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%BD%D0%B0&from=xx&to=ru&did=enc_geo&stype= (accessed 29 December 2015).
- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki (za 1971–1975). Verkhnyaya i Srednyaya Ob [Surface water resources in the USSR. Main hydrological characteristics (1971–1975). Upper and Middle Ob]. Ed. by Shurupa E.P. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1979. Vol. 15, Iss. 2, pp. 124–133.
- Vershinina I.P. Characteristics of the annual rivers flow in Kuzbass. *Tomsk State University Journal*, 2008, no. 316, pp. 201–205. In Rus.
- Zemtsov V.A., Vershinin D.A., Krutovsky A.O., Kamenskov Yu.I. *Ruslovye i poymennye protsessy rek Sibiri* [Channel and floodplain processes of Siberian rivers]. Tomsk, TML-Press, 2007. 182 p.

15. *Gosudarstvenny vodny kadastr. Ezhegodnye dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi* [The State Water Cadastre. Annual data on the regime and resources of surface waters]. Section 1, Ser. 2, P. 1, Vol. 1, Iss. 10, 1978–2005. Novosibirsk, West-Sib. Hydrometeorological Department of Environmental Monitoring, 1979–2007.
16. Malik L.K. GES na malykh rekakh Rossii: dostoinstva i nedostatki [Hydropower plants on small rivers of Russia: the advantages and disadvantages]. *Nature*, 2003, no. 1, pp. 55–62.
17. *Portal po energoberezheniyu «EnergoSvet»* [Portal of energy efficiency «EnergoSvet»]. Available at: <http://www.energoso-vet.ru/entech.php?id=36> (accessed 29 December 2015).
18. *Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 goda. Utverzhdena rasporyazheniem Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 13 noyabrya 2009 g. no. 1715-r* [Russia Energy Strategy until 2030 approved by the Federal Government on November 13, 2009 no. 1715-r. Portal Infobio], p. 74. Available at: <http://www.infobio.ru/sites/default/files/Energostrategiya-2030.pdf> (accessed 29 December 2015).
19. *Netraditsionnaya energetika. Hidroenergetika Malaya. Hidroelektrostantsii maloy moshchnosti peredvizhnye. Tipy i osnovnye parametry (Tekst dokumenta po sostoyaniyu na iyul 2011 goda). Utverzhdeny Prikazom VNIStandarta ot 10 iyunya 1994 g. № 29* [Alternative Energy. Small hydropower. Mobile low-power hydro-powers. Types and basic parameters. R 50-605-88-94 (text of the document as of July 2011). Approved by the order no. 29 of the Research Institute of the standard of 10 June 1994]. *BestPravo*. Available at: <http://www.bestpravo.ru/rossijskoje/pt-zakony/19o.htm> (accessed 29 December 2015).
20. Larin V.I. *Sostoyanie i perspektivy primeneniya vozobnovlyemykh istochnikov energii v Rossii. Kharakteristika vozobnovlyemoy energii v Regionakh Rossiyskoy Federatsii: Murmanskoy oblasti, Yaroslavskoy oblasti, Respublike Altay i Altayskom krae. Nekotorye rekomendatsii* [Status and prospects of renewable energy sources in Russia. Characteristics of renewable energy in the region of the Russian Federation: Murmansk and Yaroslavl regions, Altai Republic and Altai Territory. Recommendations]. Moscow, Lead Publ., 2006, pp. 50–53.
21. Sergeev N.N. The main directions of using the renewable energy in the Udmurt Republic. *Bulletin of Udmurt University. Economics and Law*, 2014, vol. C2, pp. 92–95. Available at: http://ru.vestnik.udsu.ru/files/originsl_articles/vuu_14_022_12.pdf (accessed 29 December 2015). In Rus.

Received: 29 December 2015

Information about the authors

Irina P. Vershinina, senior lecturer, Tomsk State University.

УДК 665.6.033.28+547-304

ВЛИЯНИЕ АЗОТИСТЫХ СОЕДИНЕНИЙ НЕФТИ НА ОБРАЗОВАНИЕ АГРЕГАТОВ АСФАЛЬТЕНОВ

Коваленко Елена Юрьевна¹,

azot@ipc.tsc.ru

Сагаченко Татьяна Анатольевна¹,

dissovet@ipc.tsc.ru

Мин Раиса Сергеевна¹,

lgosn@ipc.tsc.ru

¹ Институт химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4.

Актуальность работы обусловлена необходимостью получения информации о роли молекулярных компонентов нефтей, в частности азотистых соединений, в формировании надмолекулярных структур высокомолекулярных компонентов для лучшего понимания строения и функций таких сложных соединений, как асфальтены. Азотсодержащие соединения нефти склонны к образованию таких структур благодаря наличию ароматической системы и присутствию в их составе гетероатома, который за счет неподеленной пары электронов способен выступать в качестве координирующего центра при образовании ассоциатов в нефтяных дисперсных системах.

Цель работы: изучение влияния низко- и высокомолекулярных азотистых соединений на структурирование асфальтеновых компонентов в нефтяной дисперсной системе.

Методы исследования: элементный анализ, криоскопия в бензоле, комплексообразование с газообразным хлористым водородом, кислотная экстракция, ИК-Фурье- и ЯМР ¹H-спектроскопии, рентгеновская дифракция, микроскопия в проходящем свете, структурно-групповой анализ.

Результаты. Установлено, что введение в нефтяную дисперсную систему высоко- и низкомолекулярных азотистых соединений и их смеси приводит к заметному увеличению выхода асфальтеновых компонентов. Наибольший эффект наблюдается при обогащении нефти высокомолекулярными азотистыми соединениями, что обусловлено сходством их строения со строением исходных асфальтенов. С использованием комплекса современных физико-химических методов анализа показано, что новообразованные асфальтеновые компоненты существенно отличаются от исходных асфальтенов по элементному составу, молекулярным массам, степени ароматичности средних молекул и относительному содержанию средних и крупных частиц в их структуре. Изменение характера агрегации молекул асфальтеновых веществ, изначально содержащихся в нефти, в присутствии избытка азотистых соединений, связано с особенностями структуры и функциональных свойств молекул высокомолекулярных азотсодержащих соединений. Фазовое состояние новообразованных асфальтенов не меняется.

Ключевые слова:

Нефтяная дисперсная система, азотистые соединения, исходные и новообразованные асфальтены, состав, структурно-групповой анализ, распределение.

Введение

Постоянно растущий интерес к исследованию асфальтеновых компонентов нефтяных дисперсных систем (НДС) обусловлен, прежде всего, их негативным влиянием на свойства нефтей и остаточных фракций. Асфальтены играют существенную роль в образовании твердых отложений, которые способны закупоривать скважины, трубопроводы, наземное оборудование и поры геологических пластов [1–3], влияют на устойчивость нефтяных эмульсий и эффективность катализаторов процессов нефтепереработки [4, 5]. Особое значение работы по изучению природы асфальтеновых компонентов приобретают в связи с ростом доли тяжелых нефтей в структуре разведанных и добываемых жидких углеводородов.

Исследование асфальтеновых компонентов представляет собой достаточно трудную задачу, так как асфальтены являются наиболее полярными и сложно построенными высокомолекулярными соединениями нефти. Углеводородный скелет

их молекул содержит нафтеновые, ароматические и гетероароматические циклы с алифатическими боковыми заместителями [6–9]. В отличие от всех остальных компонентов нефти, асфальтены более склонны к образованию молекулярных ассоциаций в виде коллоидных частиц значительных размеров. В составе таких частиц собственно асфальтеновые молекулы образуют ядра, на поверхности которых адсорбируются молекулы гетероатомных и углеводородных компонентов нефтяных дистиллятов [10]. До сих пор окончательно не установлено, для каких молекулярных компонентов НДС более всего характерна способность к образованию ассоциативных нанокolloидов с молекулами асфальтенов. В процессе формирования асфальтеновых агрегатов могут участвовать азотсодержащие соединения (АС) нефти, представленные в ней смесью соединений, различающихся по молекулярной массе, содержанию гетероатомов (азота, серы, кислорода) и степени алкильного замещения молекул [11]. За счет неподеленной пары электронов ге-

тератома АС способны выступать в качестве координационного центра, образуя надмолекулярные структуры. Информация о вкладе АС в образование надмолекулярных структур высокомолекулярных компонентов НДС в настоящее время практически отсутствует. В работе изучено влияние низко- (НМ АС/ЛМ НС) и высокомолекулярных азотистых соединений (ВМ АС/ НМ НС) на структурирование асфальтеновых компонентов нефти.

Экспериментальная часть

Объекты исследования – асфальтены и АС тяжелой нефти месторождения Усинское (Тимано-Печорская НПП), которая характеризуется достаточно высокими концентрациями общего ($N_{\text{общ}}$) и основного ($N_{\text{осн}}$) азота (табл. 1).

Таблица 1. Характеристика нефти месторождения Усинское и ее компонентов

Table 1. Characteristics of oil and oil components from Usinsk oilfield

| Образец Sample | Выход, мас. % Yield, wt. % | Содержание, мас. % Content, wt. % | | | | |
|---------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|-------|------|------------------|------------------|
| | | С | Н | S | $N_{\text{общ}}$ | $N_{\text{осн}}$ |
| Нефть/Oil | 100,0 | 84,94 | 11,98 | 1,97 | 0,62 | 0,19 |
| Асфальтены Asphaltenes | 8,2 | 79,92 | 7,07 | 3,77 | 1,23 | 0,35 |
| Смоли/Resins | 22,0 | 81,14 | 9,45 | 2,96 | 1,08 | 0,55 |
| ВМ АС/ЛМ НС | 4,2 | 83,83 | 7,62 | 3,67 | 1,55 | 1,20 |
| НМ АС/ЛМ НС | 1,2 | 84,12 | 9,93 | 3,31 | 1,18 | 0,89 |

* Данные получены канд. хим. наук Н.Н. Герасимовой.

* The data were obtained by Dr. Gerasimova N.N.

Выделение и разделение АС осуществляется с помощью методов, основанных на межмолекулярных взаимодействиях. Для получения концентратов ВМ АС и НМ АС деасфальтированную нефть разбавляли н-гексаном и последовательно обрабатывали газообразным хлористым водородом и уксуснокислым раствором серной кислоты [11].

Для определения влияния АС на структурную организацию асфальтеновых компонентов в исследуемую нефть добавляли НМ АС, ВМ АС и их смесь в виде бензольных растворов, в которых количество растворенного вещества в 50, 100 и 200 раз превышало содержание каждого типа соединений в исходной нефти. Полученные смеси выдерживали в течение 24 часов для достижения равновесия системы. Использование ароматического растворителя способствует равномерному распределению АС в НДС и коагуляции нерастворимых частиц при их осаждении легкими углеводородами [12].

Из исходной нефти и модельных систем 40-кратным избытком петролейного эфира с температурой кипения 70–100 °С [12] осаждали асфальтены (А, А 50 – А 200), которые исследовали комплексом методов, включающим анализ эле-

ментного состава с использованием СНNS-анализатора Vario EL Cube, измерение молекулярных масс криоскопией в бензоле [12], ИК-Фурье-спектроскопию, ЯМР ^1H -спектроскопию, рентгеновскую дифракцию (РД) и микроскопию в проходящем свете.

Спектры ЯМР ^1H получали с помощью спектрометра ЯМР-Фурье AVANCE AV 300 фирмы Bruker при 300 МГц в растворах CDCl_3 . Внутренний стандарт – тетраметилсилан. Относительное содержание протонов в различных структурных фрагментах определяли по площади пиков сигналов в соответствующих областях спектра: $N_{\text{ар}}$ (доля протонов, содержащихся в ароматических структурах) – 6,6–8,5 м. д.; N_{α} (доля протонов у атома углерода в α -положении алифатических заместителей ароматических структур) – 2,2–4,0 м. д.; N_{β} и N_{γ} (доля протонов в метиленовых и в концевых метильных группах алифатических фрагментов молекул соответственно) – 1,1–2,1 м. д. и 0,3–1,1 м. д.

ИК-спектры регистрировали на FT-IR-спектрометре Nicolet 5700 в диапазоне 4000–400 cm^{-1} .

Сведения о молекулярных массах, элементном составе образцов и распределении протонов между различными фрагментами молекул исходных и новообразованных асфальтенов и различных типов АС, установленном с помощью ЯМР ^1H -спектроскопии, использовали при расчетах средних структурных характеристик их молекул методом структурно-группового анализа (СГА) по методике, разработанной в ИХН СО РАН [13–15].

В ходе расчетов определены следующие параметры: число атомов углерода в ароматических ($C_{\text{ар}}$), парафиновых ($C_{\text{п}}$) и нафтеновых ($C_{\text{н}}$) структурных фрагментах в средней молекуле, в α -положении к ароматическим ядрам (C_{α}) и в не связанных с ароматическими ядрами терминальных метильных группах (C_{γ}); $f_{\text{ар}}$, $f_{\text{п}}$, $f_{\text{н}}$ – доли атомов углерода в ароматических, нафтеновых и парафиновых структурных фрагментах; общее число ($K_{\text{с}}$), число ароматических ($K_{\text{ар}}$) и нафтеновых ($K_{\text{н}}$) циклов в средней молекуле; $m_{\text{ар}}$ – число ароматических блоков в средней молекуле.

Дифрактограммы получали на рентгеновском дифрактометре Discover-D8 с 2D-детектором фирмы Bruker. Условия съемки: трубка с медным анодом; расстояние между образцом и детектором – 14,9 см; диапазон измерения углов $2\theta=23-98^\circ$.

Определение размеров макромолекул асфальтенов проводили с использованием метода микроскопии в проходящем свете на микроскопе AXIO LAB.A1 Carl Zeiss. Хлороформный раствор нефтяных асфальтенов (5 %) наносили на предметное стекло и, после испарения растворителя, наблюдали за изменением кристаллической картины.

ИК-, ЯМР ^1H -спектры получены на оборудовании Томского регионального центра коллективного пользования ТНЦ СО РАН.

Результаты и их обсуждение

Как видно из рис. 1, введение в систему АС приводит к заметному увеличению выхода асфальтеновых компонентов лишь при добавлении 100-кратного избытка низко- и высокомолекулярных АС, а также их смеси. Максимальный выход А достигается при 200-кратном избытке только высокомолекулярных АС, что свидетельствует о не существенном влиянии низкомолекулярных АС на процесс агрегации асфальтеновых компонентов в НДС. Более активное участие ВМ АС в образовании агрегатов асфальтенов может быть связано с подобием строения А и ВМ АС нефти.

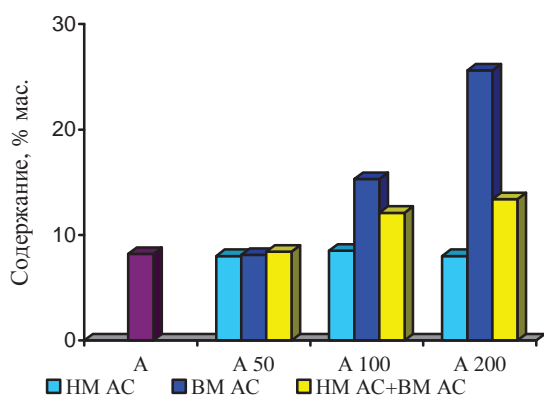


Рис. 1. Выход асфальтенов из исходной нефти и из нефтей, обогащенных азотистыми соединениями

Fig. 1. Yield of asphaltenes from initial oil and oils, enriched with nitrogen compounds

Согласно данным, приведенным в табл. 2, ВМ АС и А характеризуются близкими значениями средних молекулярных масс и структурных параметров. А и ВМ АС аккумулируют в своем составе нефтяной углерод ($f_n=54,81-53,08$ % общего углерода), мало различаются по распределению атомов углерода в ароматических ($f_a=39,86-41,52$ % общего углерода) и парафиновых фрагментах ($f_n=5,33-5,40$ % общего углерода) средних молекул. Состоят эти компоненты преимущественно из трехблочных молекул ($m_a=2,8-3,0$), в основе которых лежит полициклическая структура (K_o^*), построенная из трех ароматических (K_a^*) и пяти нефтяных (K_n^*) колец. Алкильные заместители в структурных блоках (C_n^*) содержат 1,7 углеродных атомов, входящих в состав только метильных групп ($C_n^*=C_\gamma^*$), и равное количество алкильных заместителей у ароматического цикла ($C_a^*=5,0-4,9$).

Средние молекулы ВМ АС и А характеризуются высоким содержанием серы, азота и кислорода. По данным качественной ИК-спектроскопии часть этих атомов участвует в образовании связи С-N азотных гетероциклов (дуплет в области $1600-1400$ cm^{-1}), входит в состав карбонильных (ряд полос в области $1760-1600$ cm^{-1}), гидроксильных ($3580, 3500-2900$ cm^{-1}) и сульфоксидных (1050 cm^{-1}) функциональных групп.

Присутствие в составе средних молекул А и ВМ АС конденсированных ароматических циклов и функциональных групп может приводить к изменению характера агрегации молекул асфальтеновых веществ, изначально содержащихся в нефти, за счет участия этих компонентов в межмолекулярных взаимодействиях ($\pi-\pi$ и кислотно-основные взаимодействия, образование водородных связей) [16–20].

По сравнению с А средние молекулы НМ АС преимущественно моноблочны ($m_a=1,3$). Средние структурные единицы молекул менее цикличны ($K_o^*=5,4$), главным образом, за счет низкой доли ароматических колец ($K_a^*=1,8$). На долю алифатических фрагментов в структурных единицах приходится в среднем около $C_n^*=5,8$ углеродных атомов (против $C_n^*=1,7$). Количество метильных групп, удаленных от ароматического ядра, в расчете на одну структурную единицу, составляет $C_\gamma^*=3,0$ (против $C_\gamma^*=1,7$), что указывает на наличие в молекулах НМ АС более длинных разветвленных алкильных цепей. Значительное преобладание атомов С в насыщенных структурах средних молекул НМ АС ($f_n+f_n=73,25$ %) обуславливает повышенную растворимость таких оснований в петролейном эфире, что снижает эффективность взаимодействия их молекул с молекулами асфальтенов нефти. На снижение эффективности взаимодействия оказывает влияние также низкая концентрация гетерофункций в средних молекулах НМ АС.

О не существенном вкладе НМ АС в процесс агрегации асфальтенов свидетельствуют результаты выхода асфальтеновых компонентов при совместном внесении АС различной молекулярной массы. Добавление в систему смеси НМ АС и ВМ АС так же приводит к увеличению массы асфальтеновых компонентов, но оно не столь заметно, как в случае добавления только ВМ АС. В связи с вышеизложенным сходства и различия в составе и структуре исходных и новообразованных асфальтенов прослежены на образцах асфальтеновых веществ, выделенных из исходной нефти и нефти, обогащенной ВМ АС.

Из анализа результатов, представленных в табл. 2, следует, что введение в НДС избытка ВМ АС приводит к росту средних молекулярных масс новообразованных асфальтенов (с $MM=1405$ до $MM=1945-2649$) и изменению расчетных значений структурных параметров их средних молекул. С увеличением количества добавленных в нефть АС средние молекулы асфальтенов становятся крупнее за счет роста числа структурных блоков (с $m_a=3,0$ до $m_a=3,8-4,9$). При этом параметры, характеризующие общие размеры структурных единиц ($K_o^*=7,4-8,0$) и содержащихся в них ароматических ($K_a^*=3,6-3,9$) и нефтяных ($K_n^*=3,5-4,2$) циклов, практически остаются прежними. Существенно меняется количество углеродных атомов в алифатических фрагментах структурных единиц.

В новообразованных асфальтенах на их долю приходится от $C_n^*=3,1$ до $C_n^*=6,2$ атомов С (против $C_n^*=1,7$ в А). Наблюдаемое обогащение асфальтеновых веществ алифатическими структурами может быть связано с вовлечением в состав образующихся агрегатов парафиновых углеводородов нефти [21].

Результаты СГА, касающиеся строения углеродных скелетов А и новообразованных асфальтенов, согласуются с данными, полученными методом микроскопии в проходящем свете. Его использование позволило установить, что молекулы исходных и новообразованных асфальтеновых веществ состоят из малых (5,0 мкм), средних (5–10 мкм) и крупных (>10 мкм) частиц. В А это преимущественно частицы малых и средних размеров (80 % отн.). Введение в НДС дополнительного количества ВМ АС приводит к увеличению числа средних и крупных частиц. При переходе от А к А 200 ВМ АС суммарное содержание этих частиц возрастает с 64 до 85 % отн., главным образом за счет роста доли частиц средних размеров (рис. 2).

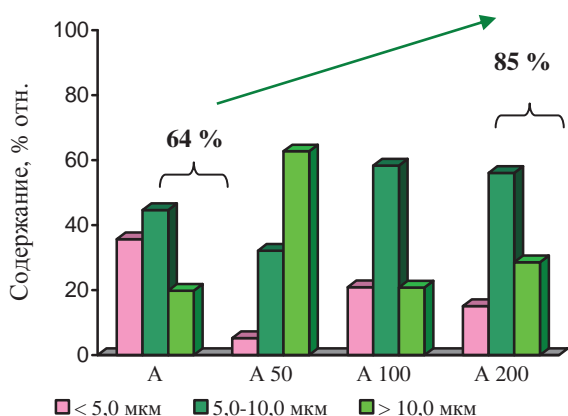


Рис. 2. Распределение молекул асфальтенов по размерам частиц (по данным микроскопии в проходящем свете)

Fig. 2. The distribution of asphaltene molecules by particle size (by the data of microscopy in transmission)

В то же время повышение расчетных габаритов структурных единиц новообразованных асфальтенов по сравнению с А не оказывает существенного влияния на структурное состояние асфальтеновых компонентов. На дифрактограммах А и асфальтенов, выделенных из нефти с различными добавками ВМ АС, картина рассеяния регистрируется как аморфной, так и кристаллической фазами образцов (отражения γ - ($2\theta=35-50^\circ$) и 002 ($2\theta=23-29^\circ$) соответственно). В качестве примера на рис. 3 приведены дифрактограммы, полученные для А и А 100 ВМ АС. На всех дифрактограммах полоса (002) намного уже полосы γ -галло, что указывает на преимущественно аморфную структуру исходных и новообразованных асфальтенов [22].

Таблица 2. Расчетные значения структурных параметров молекул низко- и высокомолекулярных АС и асфальтенов нефти месторождения Усинское

Table 2. The calculated values of structural parameters of molecules of low- and high-molecular nitrogen compounds and asphaltenes in oil from Usinsk oilfield

| Параметры/Index | Компоненты ¹ /Components ¹ | | | | | | |
|--|--|----------------|-------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|-------|
| | HM AC LM NC | BM AC HM NC | A | A 50 BM AC A 50 HM NC | A 100 BM AC A 100 HM NC | A 200 BM AC A 200 HM NC | |
| Средняя молекулярная масса Average molecular mass | 550 | 1278 | 1405 | 1945 | 2466 | 2649 | |
| Элементный состав, мас. % Elemental composition, wt. % | C | 84,12 | 83,83 | 79,92 | 79,41 | 81,32 | 79,48 |
| | H | 9,93 | 7,62 | 7,07 | 7,41 | 7,53 | 7,55 |
| | N | 1,18 | 1,55 | 1,23 | 1,20 | 1,19 | 1,14 |
| | S | 3,31 | 3,67 | 3,77 | 3,8 | 3,75 | 3,66 |
| Число атомов в средней молекуле Amount of atoms in an average molecule | C | 38,6 | 89,3 | 93,6 | 128,7 | 167,1 | 175,5 |
| | H | 54,2 | 96,6 | 98,6 | 143,0 | 184,2 | 198,4 |
| | N | 0,46 | 1,41 | 1,23 | 1,67 | 2,10 | 2,16 |
| | S | 0,57 | 1,47 | 1,66 | 2,31 | 2,89 | 3,03 |
| | O | 0,50 | 2,66 | 7,03 | 9,94 | 9,57 | 13,53 |
| Кольцевой состав Annular composition | H/C | 1,40 | 1,08 | 1,05 | 1,11 | 1,10 | 1,13 |
| | K _o | 7,3 | 23,6 | 23,8 | 28,7 | 37,6 | 36,4 |
| | K _a | 2,4 | 8,8 | 9,8 | 13,7 | 18,1 | 19,0 |
| Распределение атомов углерода, % Distribution of carbon atoms, % | K _n | 4,9 | 14,8 | 14,0 | 15,0 | 19,5 | 17,4 |
| | f _a | 26,76 | 39,86 | 41,52 | 41,44 | 42,76 | 42,07 |
| | f _n | 53,20 | 54,81 | 53,08 | 47,96 | 48,36 | 40,76 |
| Число углеродных атомов разного типа в средней молекуле Number of carbon atoms of different types in average molecule | f _n | 20,05 | 5,33 | 5,40 | 10,60 | 8,88 | 17,17 |
| | C _a | 10,3 | 35,6 | 38,9 | 53,3 | 71,5 | 73,8 |
| | C _n | 20,5 | 48,9 | 49,7 | 61,7 | 80,8 | 71,5 |
| | C _n | 7,7 | 4,8 | 5,1 | 13,6 | 14,8 | 30,1 |
| | C _a | 5,3 | 13,8 | 14,7 | 19,6 | 25,2 | 25,4 |
| | C _γ | 4,0 | 4,8 | 5,1 | 6,6 | 8,5 | 9,2 |
| Число блоков в молекуле Amount of blocks in a molecule | m _a | 1,3 | 2,8 | 3,0 | 3,8 | 4,7 | 4,9 |
| | K _o [*] | 5,4 | 8,5 | 8,0 | 7,5 | 8,0 | 7,4 |
| Параметры средних структурных блоков Parameters of average structural blocks | K _a [*] | 1,8 | 3,2 | 3,3 | 3,6 | 3,8 | 3,9 |
| | K _n [*] | 3,6 | 5,3 | 4,7 | 3,9 | 4,2 | 3,5 |
| | C [*] | 28,8 | 32,1 | 31,4 | 33,9 | 35,4 | 35,8 |
| | C _n [*] | 5,8 | 1,7 | 1,7 | 3,6 | 3,1 | 6,2 |
| | C _a [*] | 4,0 | 5,0 | 4,9 | 5,2 | 5,3 | 5,2 |
| | C _γ [*] | 3,0 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,8 | 1,9 |

¹ HM AC, BM AC – низко- и высокомолекулярные азотистые соединения; А, А 50 ВМ АС, А 100 ВМ АС, А 200 ВМ АС – асфальтены, выделенные, соответственно, из исходной нефти и нефти, обогащенной 50-, 100- и 200-кратным избытком ВМ АС. *Относится к структурной единице.

¹ LM NC, HM NC are low- and high-molecular nitrogen compounds; А, А 50 HM NC, А 100 HM NC, А 200 HM NC are asphaltenes extracted from the initial oil and the oil enriched with 50, 100 and 200 fold excess of high-molecular nitrogen compounds. * refers to a structural unit.

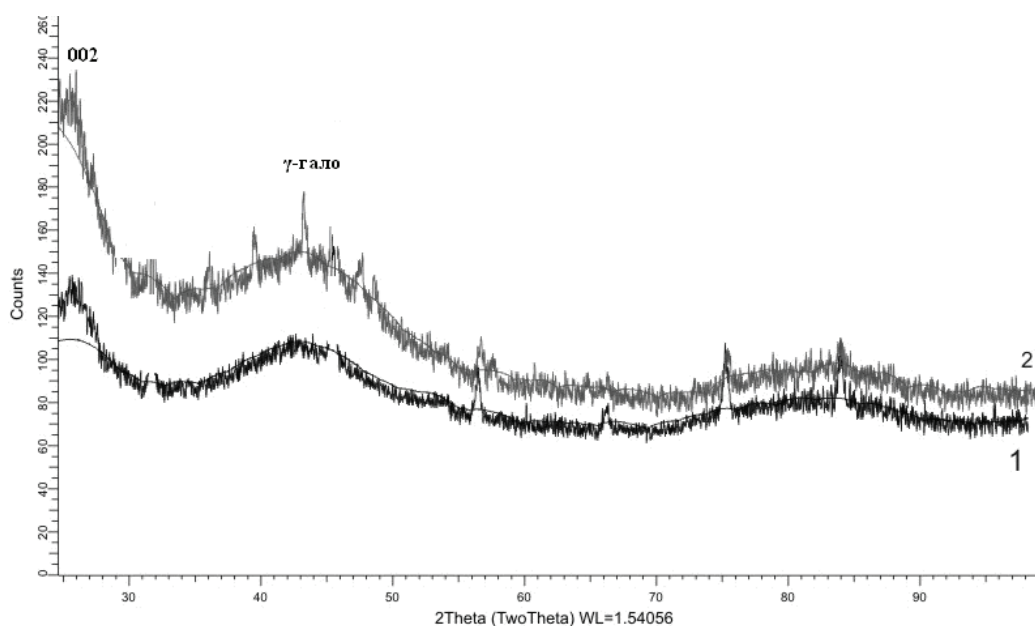


Рис. 3. Дифрактограммы асфальтенов, выделенных из исходной нефти (1) и А 100 ВМ АС (2)

Fig. 3. Diffractograms of asphaltenes isolated from the initial oil (1) and А 100 НМ АС (2)

Заключение

Таким образом, проведенное исследование показало, что введение в НДС избытка азотистых соединений приводит к заметному увеличению выхода компонентов, которые по методу выделения относят к асфальтенам. Наиболее ярко эффект образования таких компонентов проявляется для образцов нефтей, обогащенных высокомолекулярными азотистыми соединениями.

Более активное участие высокомолекулярных азотистых соединений в формировании асфальтеновых агрегатов может быть обусловлено сходством их строения со строением исходных асфальтенов.

Процесс агрегации в присутствии избытка высокомолекулярных азотистых соединений, вероятнее всего, связан с межмолекулярными взаимо-

действиями, обусловленными присутствием в структуре их средних молекул и молекул исходных асфальтенов полиареновых ядер и разнообразных гетерофункций. За счет слабых нековалентных взаимодействий происходит формирование «новых» асфальтеновых веществ с образованием агрегатов, молекулы которых состоят из большего числа структурных блоков, характеризующихся меньшей степенью ароматичности. Фазовое состояние новообразованных асфальтенов не меняется. Полученные в работе результаты расширяют представления о механизме формирования асфальтеновых агрегатов в нефтяных флюидах и имеют значение для направленного регулирования свойств нефтяных дисперсных систем с целью создания эффективных технологий их добычи, транспортировки и переработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Buckley J.S., Wang J. Crude oil and asphaltene characterization for prediction of wetting alteration // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2002. – V. 33. – № 1–3. – P. 195–202.
2. Asphaltenes – problematic but rich in potential (review) / K. Akbarzadeh, A. Hammami, A. Kharrat, D. Zhang, S. Allenson, J. Creek, S. Kabir, A. Jamaluddin, A.G. Marshall, R.P. Rodgers, O.C. Mullins, T. Solbakken // *Oilfield Review*. – 2007. – V. 19. – № 2. – P. 22–43.
3. Study of the asphaltene aggregation structure by time-resolved fluorescence spectroscopy / R.S. Souza, D.E. Nicodem, S.J. Garden, R.J. Correa // *Energy and Fuels*. – 2010. – V. 24. – № 2. – P. 1135–1138.
4. Перераспределение фракции асфальтенов в процессе термализации остаточного нефтяного сырья / Б.П. Тумаян, С.А. Синицин, Н.Н. Петрухина, А.В. Припахайло // *Технологии нефти и газа*. – 2014. – № 2. – С. 29–35.
5. Molecular size and weight of asphaltene and asphaltene solubility fractions from coals, crude oils and bitumen / S. Badre, C.C. Goncalves, K. Norinaga, O.C. Mullins // *Fuel*. – 2006. – V. 85. – № 1. – P. 1–11.
6. Мановян А.К. Технология переработки природных энергоносителей. – М.: Химия, Колосс, 2004. – 465 с.
7. Relations between asphaltene structures and their physical and chemical properties: the rosary type structure / S. Acevedo, A. Castro, J.G. Negrin, A. Fernandec, G. Escobar, V. Piscitelli, F. Delolme, G. Dessalces // *Energy and Fuels*. – 2007. – V. 21. – № 4. – P. 2165–2175.
8. Asphaltene Nanoaggregates Measured in a Live Crude Oil by Centrifugation / K. Indo, J. Ratulowski, B. Dindoruk, J.L. Gao,

- J.L. Zuo, O.C. Mullins // *Energy and Fuels*. – 2009. – V. 23. – № 9. – P. 4460–4469.
9. Гордадзе Г.Н. Термолиз органического вещества в нефтегазопоисковой геохимии. – М.: ИГиРГИ, 2002. – 336 с.
 10. Antipenko V.R., Grin'ko A.A., Melenevskii V.N. Composition of products of analytical pyrolysis of resin and asphaltene fractions of usa oil // *Petroleum chemistry*. – 2014. – V. 54. – № 3. – P. 178–186.
 11. Mullins O.C. The Modified Yen Model // *Energy and Fuels*. – 2010. – V. 24. – № 4. – P. 2179–2207.
 12. Unraveling the molecular structures of asphaltenes by atomic force microscopy / B. Schuler, V. Meyer, D. Peña, O.C. Mullins, L. Gross // *Journal of Saudi Chemical Society*. – 2015. – V. 137. – № 31. – P. 9870–9876.
 13. Álvarez E., Trejo F., Marroquín G. Ancheyta J. The Effect of Solvent Washing on Asphaltenes and Their Characterization // *Petroleum Science and Technology*. – 2015. – V. 33. – № 3. – P. 265–271.
 14. Химический состав нефтей Западной Сибири / О.А. Бейко, А.К. Головки, Л.В. Горбунова, В.Ф. Камьянов, А.К. Лебедев, А.Н. Плюснин, Ю.В. Савиных, П.П. Сивирянов, Т.А. Филимонова. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. – 288 с.
 15. Дифференцированное выделение азотистых соединений из нефти и продуктов её деасфальтенизации / О.С. Воронова, Н.Н. Герасимова, Л.А. Цой, Т.А. Сагаченко, О.А. Бейко, Г.Ф. Большаков // *Нефтехимия*. – 1987. – Т. 27. – № 4. – С. 447–454.
 16. Современные методы исследования нефтей / под ред. А.И. Богомолова, М.Б. Темьянко, Л.И. Хотынцевой. – Л.: Недра, 1984. – 431 с.
 17. Камьянов В.Ф., Большаков Г.Ф. Структурно-групповой анализ компонентов нефти // *Нефтехимия*. – 1984. – Т. 24. – № 4. – С. 443–449.
 18. Камьянов В.Ф., Большаков Г.Ф. Определение структурных параметров при структурно-групповом анализе компонентов нефти // *Нефтехимия*. – 1984. – Т. 24. – № 4. – С. 450–459.
 19. Камьянов В.Ф., Большаков Г.Ф. Особенности применения новой расчетной схемы структурно-группового анализа компонентов нефти // *Нефтехимия*. – 1984. – Т. 24. – № 4. – С. 460–468.
 20. Rogel E. Simulation of interactions in asphaltene aggregates // *Energy and Fuels*. – 2000. – V. 14. – № 3. – P. 566–574.
 21. Molecular dynamics simulation of the heat-induced relaxation of asphaltene aggregates / T. Takonahashi, S. Sato, I. Saito, R. Tanaka // *Energy and Fuels*. – 2003. – V. 17. – № 1. – P. 135–139.
 22. Study on the aggregation of residue-derived asphaltene molecules / D. Liu, X. Kong, M. Li, Z. Wang // *Energy and Fuels*. – 2010. – V. 24. – № 6. – P. 3624–3627.
 23. Association behavior of pyrene compounds as models for asphaltenes / K. Akbarzadeh, D.C. Bressler, J. Wang, K.L. Gawrys, M.R. Gray, P.K. Kilpatrick, H.W. Yarranton // *Energy and Fuels*. – 2005. – V. 19. – № 4. – P. 1268–1271.
 24. Varadaraj R., Brons C. Molecular origins of heavy oil interfacial activity. Part 1: Fundamental interfacial properties of asphaltenes derived from heavy crude oils and their correlation to chemical composition // *Energy and Fuels*. – 2007. – V. 21. – № 1. – P. 195–198.
 25. Porte G., Zhou H., Lazzeri V. Reversible description of asphaltene colloidal association and precipitation // *Langmuir*. – 2003. – V. 19. – № 1. – P. 40–47.
 26. Унгер Ф.Г., Андреева Л.Н. Фундаментальные аспекты химии нефти. Природа смол и асфальтенов. – Новосибирск: Наука, 1995. – 192 с.

Поступила 22.01.2016 г.

Информация об авторах

Коваленко Е.Ю., кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории гетероорганических соединений нефти Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

Сагаченко Т.А., доктор химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории гетероорганических соединений нефти Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

Мин Р.С., доктор химических наук, заведующая лабораторией гетероорганических соединений нефти Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

UDC 665.6.033.28+547-304

EFFECT OF NITROGEN COMPOUNDS IN OIL ON FORMATION OF ASPHALTENE AGGREGATES**Elena Yu. Kovalenko¹,**

azot@ipc.tsc.ru

Tatyana A. Sagachenko¹,

dissovet@ipc.tsc.ru

Raisa S. Min¹,

lgosn@ipc.tsc.ru

¹ Institute of petroleum chemistry Siberian branch Russian Academy of Sciences, 4, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634055, Russia.

The work is relevant due to the need to obtain information on the role of molecular components, occurring in oil, in particular nitrogen compounds, in formation of supramolecular structures of high-molecular components for better understanding the structure and function of such complex compounds as asphaltenes. Nitrogen-containing compounds in oil are prone to form such structures due to the aromatic system in their structure and the presence of the heteroatom, which can act as a coordinating centre in formation of associates in oil dispersed systems due to a lone-electron pair.

The aim of the research is to study the effect of low- and high-molecular nitrogen compounds on structuring the asphaltene components in the oil dispersed system.

Methods: elemental analysis, cryoscopy in benzene, complexing with gaseous hydrogen chloride, acid extraction, IR-Fourier and ¹H NMR spectroscopy, X-ray diffraction, microscopy in transmission, carbon-group analysis.

Results. It was ascertained that introduction of high- and low-molecular nitrogen compounds and their mixture into oil dispersed system increases significantly the yield of the asphaltene components. The greatest effect was observed in the oil, enriched with high-molecular nitrogen compounds, due to their structural similarity with the structures of the initial asphaltenes. Using a complex of up-to-date phy-sicochemical methods of analysis it was shown that the newly formed asphaltene components differ considerably from the initial asphaltenes in elemental composition, molecular weight, degree of aromaticity of average molecules and relative content of average and large particles in their structure. The change in the way of molecule aggregation in asphaltene substances, originally contained in oil, at the excess of nitrogenous compounds is related to structural features and functional properties of the high-molecular nitrogen compounds. The phase state of the newly formed asphaltenes remains.

Key words:

Oil dispersed system, nitrogen compounds, initial and newly formed asphaltenes, composition, carbon-group analysis, distribution.

REFERENCES

- Buckley J.S., Wang J. Crude oil and asphaltene characterization for prediction of wetting alteration. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2002, vol. 33, no. 1–3, pp. 195–202.
- Akbarzadeh K., Hammami A., Kharrat A., Zhang D., Allenson S., Creek J., Kabir S., Jamaluddin A., Marshall A.G., Rodgers R.P., Mullins O.C., Solbakken T. Asphaltenes – problematic but rich in potential (Review). *Oilfield Review*, 2007, vol. 19, no. 2, pp. 22–43.
- Souza R.S., Nicodem D.E., Garden S.J., Correa R.J. Study of the asphaltene aggregation structure by time-resolved fluorescence spectroscopy. *Energy and Fuels*, 2010, vol. 24, no. 2, pp. 1135–1138.
- Tumanyan B.P., Sinitsin S.A., Petrukhnina N.N., Pripakhaylo A.V. Pereraspredelenie fraksii asfaltenov v protsesse termoliza ostatochnogo neftyanogo syrja [Asphaltene subfractions redistribution during thermolysis of residual petroleum feedstock]. *Tekhnologii nefi i gaza*, 2014, no. 2, pp. 29–35.
- Badre S., Goncalves C.C., Norinaga K., Mullins O.C. Molecular size and weight of asphaltene and asphaltene solubility fractions from coals, crude oils and bitumen. *Fuel*, 2006, vol. 85, no. 1, pp. 1–11.
- Manovyan A.K. *Tekhnologiya pererabotki prirodnnykh energonositeley* [Technology for processing natural energy carriers]. Moscow, Khimiya, Koloss Publ., 2004. 465 p.
- Acevedo S., Castro A., Negrin J.G., Fernandez A., Escobar G., Piscitelli V., Delolme F., Dessalces G. Relations between asphaltene structures and their physical and chemical properties: the rosary type structure. *Energy and Fuels*, 2007, vol. 21, no. 4, pp. 2165–2175.
- Indo K., Ratulowski J., Dindoruk B., Gao J.L., Zuo J.L., Mullins O.C. Asphaltene Nanoaggregates Measured in a Live Crude Oil by Centrifugation. *Energy and Fuels*, 2009, vol. 23, no. 9, pp. 4460–4469.
- Gordadze G.N. *Termoliz organicheskogo veshchestva v neftegazopiskovoy geokhimii* [Thermolysis of organic matter in oil- and gas-prospecting geochemistry]. Moscow, IGI RGI Publ., 2002. 336 p.
- Antipenko V.R., Grin'ko A.A., Melenevskii V.N. Composition of products of analytical pyrolysis of resin and asphaltene fractions of usa oil. *Petroleum chemistry*, 2014, vol. 54, no. 3, pp. 178–186. In Rus.
- Mullins O.C. The Modified Yen Model. *Energy and Fuels*, 2010, vol. 24, no. 4, pp. 2179–2207.
- Schuler B., Meyer V., Peña D., Mullins O.C., Gross L. Unraveling the molecular structures of asphaltenes by atomic force microscopy. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2015, vol. 137, no. 31, pp. 9870–9876.
- Álvarez E., Trejo F., Marroquín G., Ancheytá J. The Effect of Solvent Washing on Asphaltenes and Their Characterization. *Petroleum Science and Technology*, 2015, vol. 33, no. 3, pp. 265–271.
- Beyko O.A., Golovko A.K., Gorbunova L.V., Kamianov V.F., Lebedev A.K., Plyusnin A.N., Savinykh Yu.V., Sivirilov P.P., Filimonova T.A. *Khimicheskii sostav neftey Zapadnoy Sibiri* [Chemical composition of oils in Western Siberia]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1988. 288 p.

15. Voronova O.S., Gerasimova N.N., Tsoy L.A., Sagachenko T.A., Beyko O.A., Bolshakov G.F. Differential isolation of nitrogen compounds of crude oil and their deasphaltenizates. *Petroleum Chemistry*, 1987, vol. 27, no. 4, pp. 447–454. In Rus.
16. Bogomolov A.I., Temyanko M.B., Khotyntseva L.I. *Sovremennye metody issledovaniya neftey* [Modern oil investigation techniques]. Leningrad, Nedra Publ., 1984. 431 p.
17. Kamyanov V.F., Bolshakov G.F. Carbon-group analysis of oil components. *Petroleum Chemistry*, 1984, vol. 24, no. 4, pp. 443–449. In Rus.
18. Kamyanov V.F., Bolshakov G.F. Determination of structural parameters in structural and group analysis of petroleum components. *Petroleum Chemistry*, 1984, vol. 24, no. 4, pp. 450–459. In Rus.
19. Kamyanov V.F., Bolshakov G.F. Features of a new design scheme for carbon-group analysis of oil components. *Petroleum Chemistry*, 1984, vol. 24, no. 4, pp. 460–468. In Rus.
20. Rogel E. Simulation of interactions in asphaltene aggregates. *Energy and Fuels*, 2000, vol. 14, no. 3, pp. 566–574.
21. Takonahashi T., Sato S., Saito I., Tanaka R. Molecular dynamics simulation of the heat-induced relaxation of asphaltene aggregates. *Energy and Fuels*, 2003, vol. 17, no. 1, pp. 135–139.
22. Liu D., Kong X., Li M., Wang Z. Study on the aggregation of residue-derived asphaltene molecules. *Energy and Fuels*, 2010, vol. 24, no. 6, pp. 3624–3627.
23. Akbarzadeh K., Bressler D.C., Wang J., Gawrys K.L., Gray M.R., Kilpatrick P.K., Yarranton H.W. Association behavior of pyrene compounds as models for asphaltenes. *Energy and Fuels*, 2005, vol. 19, no. 4, pp. 1268–1271.
24. Varadaraj R., Brons C. Molecular origins of heavy oil interfacial activity. Part 1: Fundamental interfacial properties of asphaltenes derived from heavy crude oils and their correlation to chemical composition. *Energy and Fuels*, 2007, vol. 21, no. 1, pp. 195–198.
25. Porte G., Zhou H., Lazzeri V. Reversible description of asphaltene colloidal association and precipitation. *Langmuir*, 2003, vol. 19, no. 1, pp. 40–47.
26. Unger F.G., Andreeva L.N. *Fundamentalnye aspekty khimii nefiti. Priroda smol i asfaltenov* [The fundamental aspects of petroleum chemistry. The nature of resins and asphaltenes]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1995. 192 p.

Received: 22 January 2016.

Information about the authors

Elena Yu. Kovalenko, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Tatyana A. Sagachenko, Dr. Sc., leading researcher, Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Raisa S. Min, Dr. Sc., Head of the Laboratory, Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 661.152.32

ПОЛУЧЕНИЕ КАЛИЙНО-АЗОТНОГО СУЛЬФАТНОГО УДОБРЕНИЯ КОНВЕРСИЕЙ ХЛОРИДА КАЛИЯ СЕРНОЙ КИСЛОТОЙ

Шевелева Ольга Геннадьевна¹,
Olgatnv07@rambler.ru

Рупчева Вера Александровна¹,
Poilov@pstu.ru

Пойлов Владимир Зотович¹,
Poilov@pstu.ru

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

Актуальность работы обусловлена необходимостью получения комплексных сульфатных калийных удобрений, не содержащих в своем составе хлорид-иона, накопление которого в почве приводит к снижению урожайности и повышению уровня засоления почвы.

Цель работы: исследование стадий конверсии хлорида калия серной кислотой и нейтрализации гидросульфата калия раствором аммиака в технологии получения калийно-азотного сульфатного удобрения, определение оптимальных параметров протекания этих стадий.

Методы исследования: теоретический анализ протекающих процессов, моделирование технологического процесса в лабораторных условиях, определение концентрации соляной кислоты путем argentометрического титрования хлорид-иона, исследование изменения содержания иона HSO_4^- посредством титрования продукта гидроксидом натрия, рентгенофазовый анализ продукта, полученного при нейтрализации.

Результаты. Исследован процесс получения калийно-азотного сульфатного удобрения путем вакуумной конверсии хлорида калия серной кислотой с последующей нейтрализацией полученного гидросульфата калия раствором аммиака. На стадии конверсии установлено влияние остаточного давления и концентрации серной кислоты в реакционной смеси на выход основных продуктов – гидросульфата калия и хлороводорода, а также концентрацию получаемой соляной кислоты. При исследовании процесса нейтрализации гидросульфата калия раствором аммиака получены зависимости степени нейтрализации от длительности процесса при температурах 25, 40 и 60 °С.

Выводы. Установлено, что применение разряжения на стадии конверсии хлорида калия серной кислотой позволяет снизить температуру кипения реакционной смеси, тем самым уменьшить температуру процесса конверсии, а также увеличить выход основных продуктов конверсии – гидросульфата калия и хлороводорода. Выявлено, что с увеличением концентрации серной кислоты в реакционной смеси выход гидросульфата калия и хлороводорода возрастает. Процесс конверсии следует проводить при избытке серной кислоты от стехиометрии, так как серная кислота, являясь водоотнимающим реагентом, связывает часть воды и тем самым снижает растворимость продуктов реакции. Чтобы избежать накопления серной кислоты в маточном растворе и потери сырья, избыток серной кислоты должен составлять не более чем 20 % от стехиометрического количества, рассчитанного по уравнению реакции. Продуктом нейтрализации гидросульфата калия раствором аммиака является сульфат калия-аммония KNH_4SO_4 , который можно использовать в качестве комплексного калийно-азотного удобрения. На основании проведенных исследований определены оптимальные параметры протекания процессов конверсии хлорида калия серной кислотой ($T=90$ °С, остаточное давление 40 кПа, соотношение $\text{H}_2\text{O}/\text{KCl}=1,5$, концентрация H_2SO_4 46 % мас.) и нейтрализации гидросульфата калия раствором аммиака ($T=60$ °С, $t=40$ минут) в технологии получения калийно-азотного сульфатного удобрения.

Ключевые слова:

Калийно-азотные сульфатные удобрения, гидросульфат калия, серная кислота, хлорид калия, аммиак, сульфат калия-аммония, конверсия, нейтрализация.

Производство бесхлорных калийных удобрений с высоким содержанием питательных компонентов, хорошими физико-химическими и механическими свойствами, которые можно использовать на различных почвах для большого числа культур – перспективное направление развития калийной промышленности [1]. В данной работе рассмотрена технология получения калийно-азотного сульфатного удобрения путем конверсии хлорида калия серной кислотой с нейтрализацией полученного гидросульфата калия раствором аммиака.

На первой стадии процесса происходит взаимодействие хлорида калия и серной кислоты согласно реакции [2]:



Представленная реакция является эндотермической, поэтому проводить технологический процесс получения гидросульфата калия рекомендуется при повышенных температурах. В известных способах в качестве сырья для конверсии используют кристаллический хлорид калия и концентрированную серную кислоту [3–6]. Согласно немецкой технологии Мангейма процесс конверсии хлорида калия проводят в печи при температуре выше 250 °С [7]. Недостатками технологии является высокая энергоемкость, а также налипание реагентов и продуктов реакции на стенки оборудования, что значительно затрудняет процесс и приводит к бы-

струму износу оборудования [8, 9]. Л. Финкельштейном предложен другой вариант конверсии, в котором на кристаллический хлорид калия воздействуют серной кислотой с концентрацией 70 мас. %. Процесс проводят в реакторе при постоянном перемешивании при температуре порядка 120 °С [10]. Данный способ конверсии требует введения дополнительных стадий, таких как разбавление серной кислоты, фильтрование и сушка полученного гидросульфата калия [11, 12].

Процесс конверсии хлорида калия серной кислотой включает такие стадии, как растворение хлорида калия, разбавление серной кислоты, химическая реакция между KCl и H_2SO_4 в соответствии с уравнением (1), десорбция хлороводорода из реакционной смеси, испарение воды и кристаллизация гидросульфата калия. В данной работе процесс конверсии суспензии хлорида калия серной кислотой изучали при концентрации H_2SO_4 в реакционной смеси 35–46 % при температуре кипения раствора, которую уменьшали за счет применения вакуума. Концентрация серной кислоты в реакционной смеси зависит от соотношения H_2O/KCl в суспензии хлорида калия. При уменьшении концентрации серной кислоты ниже 35 % мас. концентрация реагентов в реакционной смеси будет низкой, поэтому скорость процесса будет невысокой. При увеличении концентрации H_2SO_4 от 46 % мас. и выше стадия растворения хлорида калия будет проходить медленно из-за недостатка воды для растворения. При исследуемых условиях (соотношение H_2O/KCl – выше точки насыщения раствора хлоридом калия [13]) процесс растворения KCl протекает быстро. Химическая реакция в растворе при повышенной температуре идет также с достаточной скоростью [14]. Ввиду высокой растворимости гидросульфата калия в воде [15] при повышенных температурах кристаллизация наступает только при охлаждении реакционной смеси. Следовательно, в исследуемом интервале концентраций серной кислоты наиболее медленно идет стадия десорбции хлороводорода.

Гидросульфат калия $KHSO_4$ имеет высокое содержание иона HSO_4^- (38,2 % мас.), придающего соединению кислую среду, поэтому использовать данное вещество в качестве готового удобрения невозможно. Необходима стадия нейтрализации гидросульфата калия. Исследования процесса нейтрализации гидросульфата калия газообразным аммиаком показали, что в результате взаимодействия NH_3 и $KHSO_4$ образуется смесь гидросульфата калия-аммония $(KNH_4H)_2(SO_4)_3$ и тригидросульфата калия $K_3H_3(SO_4)_4$. Это свидетельствует о том, что процесс нейтрализации гидросульфата калия газообразным аммиаком протекает не до конца [16]. В представленной работе изучали процесс нейтрализации гидросульфата калия раствором аммиака в соответствии с реакцией



Взаимодействие гидросульфата калия с гидроксидом аммония – процесс экзотермический, протекает с большим выделением тепла. Для избежания потерь аммиака избыточное количество тепла необходимо отводить. Процесс нейтрализации гидросульфата калия раствором аммиака протекает по сложному механизму. Взаимодействие гидросульфата калия с ионами аммония может протекать как на поверхности частиц, так и в растворе, поскольку часть гидросульфата калия растворяется ввиду его высокой растворимости в воде. Процесс нейтрализации в этом случае сопровождается такими стадиями, как диффузия ионов аммония к поверхности частиц гидросульфата калия, диффузия ионов аммония внутри частиц гидросульфата, химическое взаимодействие ионов аммония с гидросульфатом калия. К тому же реакция взаимодействия гидросульфата калия и гидроксида аммония (уравнение (1)) проходит с образованием воды, которая также растворяет частицы гидросульфата калия. Поскольку растворимость сульфата калия-аммония значительно ниже растворимости гидросульфата калия, возможно высаливание сульфата калия-аммония из раствора [17].

Экспериментальная часть

Для исследования конверсии хлорида калия использовали мелкокристаллический флотационный хлорид калия с размером частиц менее 0,32 мм и концентрированную серную кислоту (92,5 % мас.) [18, 19]. Процесс проводили в реакторе при постоянной скорости перемешивания 600 об/мин под разрежением от 0 до 60 кПа. При этом в реактор помещали суспензию хлорида калия, которую разогревали до температуры 60 °С, затем через делительную воронку постепенно добавляли серную кислоту в течение 15 мин. Суспензию хлорида калия готовили при соотношениях $H_2O/KCl=1,5; 2; 2,5$. В зависимости от соотношения H_2O/KCl изменялась концентрация серной кислоты в системе от 35 до 46 % мас. За счет разбавления серной кислоты наблюдали дополнительный разогрев реакционной смеси. При нагревании суспензии происходил процесс растворения хлорида калия. Температуру в реакторе поддерживали посредством нагревателя. Для создания разрежения использовали вакуум-насос. Герметизацию перемешивающего устройства обеспечивали при помощи гидрозатвора. Выделяемые в газовую фазу пары хлороводорода и воды конденсировали в холодильнике-конденсаторе, охлаждаемом холодной водой, и собирали в мерной емкости. Полученную суспензию гидросульфата калия охлаждали до комнатной температуры, фильтровали при помощи воронки Бюхнера и колбы Бунзена, отделенные кристаллы гидросульфата калия сушили при температуре 110 °С. При исследовании процесса конверсии хлорида калия серной кислотой измеря-

ли объем и концентрацию полученной соляной кислоты, а также массу полученного гидросульфата калия. Концентрацию соляной кислоты определяли путем argentометрического титрования хлорид-иона. Величина относительной ошибки при определении концентрации соляной кислоты составила не более 2 %, а абсолютная погрешность при измерении объема не превышает 1 мл. На основании полученных результатов оценивали влияние величины остаточного давления и концентрации серной кислоты на выход основных продуктов: гидросульфата калия и соляной кислоты. Зависимость температуры кипения реакционной смеси от остаточного давления представлена на рис. 1 [20].

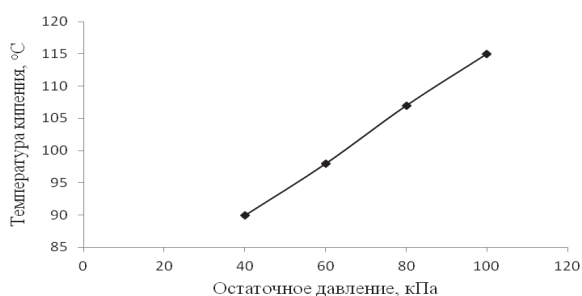


Рис. 1. Зависимость температуры кипения реакционной смеси от остаточного давления

Fig. 1. Dependence of the reaction mixture boiling temperature on the residual pressure

Как видно на рис. 1, температура кипения реакционной смеси уменьшается при увеличении разряжения. Минимальная температура процесса конверсии, полученная в лабораторных условиях при остаточном давлении 40 кПа, составила 90 °C.

Процесс нейтрализации гидросульфата калия раствором аммиака исследовали при температурах 25, 40 и 60 °C в реакторе при постоянной скорости перемешивания 600 об/мин. При этом в реактор в стехиометрическом соотношении добавляли гидросульфат калия и раствор аммиака. Для исследования использовали гидросульфат калия, полученный на стадии конверсии, и аммиак водный технический с массовой долей аммиака не менее 25 % (ГОСТ 9-92) [21]. Температуру в реакционной среде поддерживали с помощью термостата и регистрировали термометром. В течение эксперимента через определенные интервалы времени отбирали пробы твердого продукта и определяли в нем содержание иона HSO_4^- путем титрования 0,1N раствором гидроксида натрия. Когда содержание иона HSO_4^- в продукте становилось менее 0,6 % мас. (приемлемого значения для использования продукта в качестве удобрения), эксперимент завершали. Относительная ошибка при титровании иона HSO_4^- также не превышала 2 %. Полученную после нейтрализации суспензию фильтровали при помощи воронки Бюхнера и колбы Бунзена. Твердый продукт, полученный при нейтрализации, су-

шили до постоянного веса при температуре 110 °C и анализировали на рентгеновском дифрактометре марки SHIMADZU XRD-7000.

Результаты и обсуждения

Зависимость концентрации полученной соляной кислоты от величины остаточного давления и концентрации серной кислоты в реакционной смеси представлена на рис. 2.

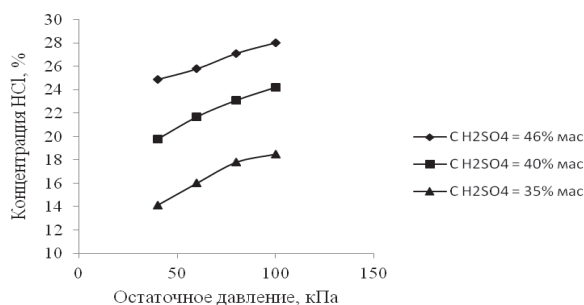


Рис. 2. Зависимость концентрации полученной соляной кислоты (% мас.) от величины остаточного давления и концентрации серной кислоты в реакционной смеси

Fig. 2. Dependence of the obtained hydrogen chloride concentration (% wt.) on the value of the residual pressure and concentration of sulfuric acid in the reaction mixture

На рис. 2 показано, что концентрация получаемой соляной кислоты ниже при большем разряжении и меньшей концентрации серной кислоты в системе. Это вызвано тем, что при протекании процесса конверсии пары хлороводорода выделяются вместе с парами воды, а применение разряжения интенсифицирует процесс выделения паров воды. При меньшей концентрации серной кислоты в конвертируемой смеси в системе содержится большее количество воды, которая является растворителем для хлороводорода и гидросульфата калия. Следовательно, концентрация продуктов реакции в реакционной смеси снижается, а при меньшей концентрации хлороводорода движущая сила процесса десорбции становится ниже. Максимальная концентрация соляной кислоты (29,8 % мас.) получена при концентрации серной кислоты 46 % мас. при отсутствии разряжения в системе. Получить продукционную соляную кислоту с концентрацией 32 мас. % при данном варианте технологии невозможно. Соляную кислоту, получаемую в исследуемом процессе конверсии с введенными ингибиторами коррозии, можно использовать в нефтедобыче, металлургии и для очистки оборудования от отложений.

Зависимость объема полученной соляной кислоты (% мас.) от остаточного давления и концентрации серной кислоты в реакционной смеси изображена на рис. 3.

Увеличение объема полученной соляной кислоты при уменьшении остаточного давления (рис. 3) подтверждает тот факт, что концентрация соляной кислоты уменьшается за счет интенсификации

процесса испарения воды. Объем выделяемой соляной кислоты увеличивается также при уменьшении концентрации серной кислоты в реакционной смеси. При сравнении объема и концентрации получаемой соляной кислоты при различной концентрации серной кислоты и вакууме в системе невозможно в полном объеме оценить влияние этих параметров на протекание процесса конверсии. Для более полной оценки рассчитан выход продуктов реакции: гидросульфата калия (KH_2SO_4) и хлороводорода (HCl) по формулам (3) и (4) соответственно.

$$X_{\text{KH}_2\text{SO}_4} = \frac{m_{\text{KH}_2\text{SO}_4 \text{ пр}}}{m_{\text{KH}_2\text{SO}_4 \text{ теор}}} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где $m_{\text{KH}_2\text{SO}_4 \text{ пр}}$ – масса гидросульфата калия, полученного в результате реакции, г; $m_{\text{KH}_2\text{SO}_4 \text{ теор}}$ – масса гидросульфата калия, рассчитанная по уравнению реакции, г.

$$X_{\text{HCl}} = \frac{V_{\text{HCl}} \cdot \rho_{\text{HCl}} \cdot C_{\text{HCl}}}{m_{\text{HCl теор}}}, \quad (4)$$

где V_{HCl} – объем выделившейся соляной кислоты, мл; C_{HCl} – концентрация выделившейся соляной кислоты, % мас.; ρ_{HCl} – плотность выделившейся соляной кислоты, г/см³; $m_{\text{HCl теор}}$ – масса соляной кислоты, рассчитанная по уравнению реакции, г.

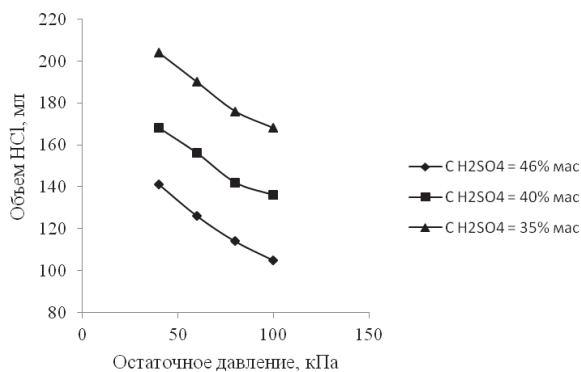


Рис. 3. Зависимость объема полученной соляной кислоты от величины остаточного давления и концентрации серной кислоты в реакционной смеси

Fig. 3. Dependence of the volume of the obtained hydrogen chloride on the value of the residual pressure and concentration of sulfuric acid in the reaction mixture

Влияние остаточного давления и концентрации серной кислоты в реакционной смеси на выход гидросульфата калия и хлороводорода отражено на рис. 4 и 5 соответственно.

Выход гидросульфата калия выше при меньшем остаточном давлении в системе (рис. 4), так как при этом из системы удаляется большее количество воды. Вода для гидросульфата калия является растворителем, а уменьшение количества растворителя приводит к увеличению концентрации гидросульфата калия в кристаллизуемой суспензии, что позволяет увеличить выход продукта.

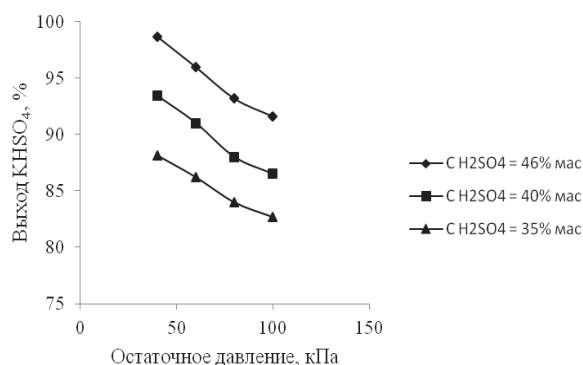


Рис. 4. Влияние остаточного давления и концентрации серной кислоты в реакционной смеси на выход гидросульфата калия

Fig. 4. Influence of the residual pressure and concentration of sulfuric acid in the reaction mixture on the yield of potassium hydrogen sulfate

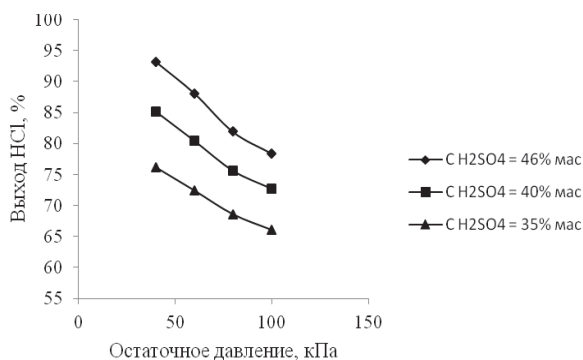


Рис. 5. Влияние остаточного давления и концентрации серной кислоты в реакционной смеси на выход хлороводорода

Fig. 5. Influence of the residual pressure and concentration of sulfuric acid in the reaction mixture on the yield of hydrogen chloride

Выход хлороводорода (рис. 5) возрастает при увеличении разрежения, что можно объяснить увеличением движущей силы процесса десорбции HCl . Максимальный выход хлороводорода (93,4 %) и гидросульфата калия (98,7 %) получен при концентрации серной кислоты 46 % мас. и остаточном давлении 40 кПа. Невысокий выход хлороводорода, а также влияние разрежения на выход HCl косвенно свидетельствуют о том, процесс конверсии хлорида калия лимитируется стадией выделения хлороводорода из реакционной среды.

Увеличение выхода основных продуктов – хлороводорода и гидросульфата калия – при возрастании концентрации серной кислоты в конвертируемой системе (рис. 4 и 5) обусловлено увеличением при этих условиях скорости химической реакции взаимодействия хлорида калия с серной кислотой. Также в этом случае в системе содержится меньшее количество воды, растворяющей продукты реакции, которые остаются в маточном растворе.

Избыток серной кислоты сверх стехиометрического количества может использоваться в данном процессе как водоотнимающий реагент, снижающий растворимость хлороводорода и гидросульфата калия. Влияние избытка серной кислоты на выход основных продуктов исследовали при остаточном давлении 40 кПа и температуре 90 °С. При этом избыток серной кислоты рассчитывали в процентах от стехиометрического количества. Зависимость выхода основных продуктов конверсии от избытка серной кислоты представлена на рис. 6.

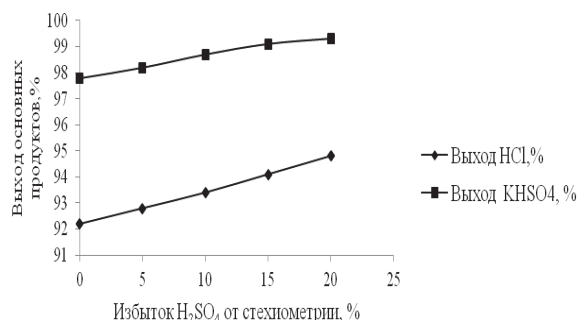


Рис. 6. Зависимость выхода основных продуктов конверсии от избытка серной кислоты

Fig. 6. Dependence of the yield of the basic products of conversion on the sulfuric acid excess

Из рис. 6 следует, что избыток серной кислоты позволяет увеличить выход гидросульфата калия и хлороводорода. При этом избыток серной кислоты в конвертируемом растворе в большей степени влияет на выход хлороводорода, что обусловлено различным влиянием присутствия серной кислоты на растворимость гидросульфата калия и хлороводорода. Однако использование большого избытка серной кислоты приведет к накоплению серной кислоты в маточном растворе и потерям сырья. Следовательно, избыток серной кислоты в процессе конверсии не может быть более 20 % от стехиометрического количества.

Исследования нейтрализации гидросульфата калия раствором аммиака в реакторе с механическим перемешиванием показали, что процесс наиболее эффективно протекает в растворе, чем в газовой фазе [16]. Зависимости содержания иона HSO₄⁻ в продукте от длительности нейтрализации при различных температурах приведены на рис. 7.

Из анализа кривых, приведенных на рис. 7, следует, что процесс нейтрализации гидросульфата калия раствором аммиака практически полностью завершается по истечении 40 мин. При более высоких температурах содержание иона HSO₄⁻ в продукте нейтрализации ниже. Однако температура процесса мало влияет на содержание иона HSO₄⁻ в продукте. На основе полученных значений содержания иона HSO₄⁻ в различные интервалы времени рассчитана степень нейтрализации гидросульфата калия для исследуемых температур:

$$\alpha = \frac{C_0 - C}{C_0}, \quad (5)$$

где C_0 – начальное содержание иона HSO₄⁻ в гидросульфате калия, % масс.; C – содержание иона HSO₄⁻ в продукте нейтрализации в исследуемый промежуток времени, мас. %.

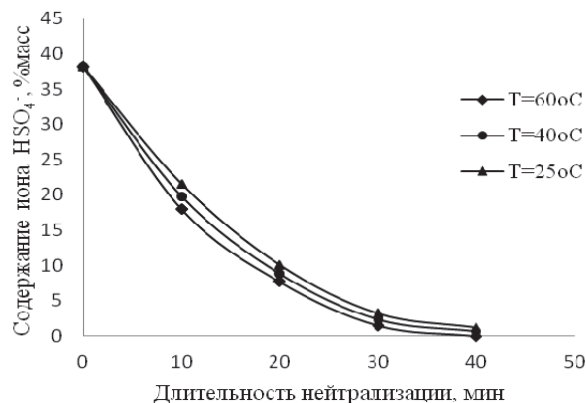


Рис. 7. Зависимости содержания иона HSO₄⁻ в продукте от длительности нейтрализации при различных температурах

Fig. 7. Dependence of HSO₄⁻ ion content in the product on neutralization duration at different temperatures

Зависимости степени нейтрализации гидросульфата калия раствором аммиака от длительности процесса при различных температурах представлены на рис. 8.

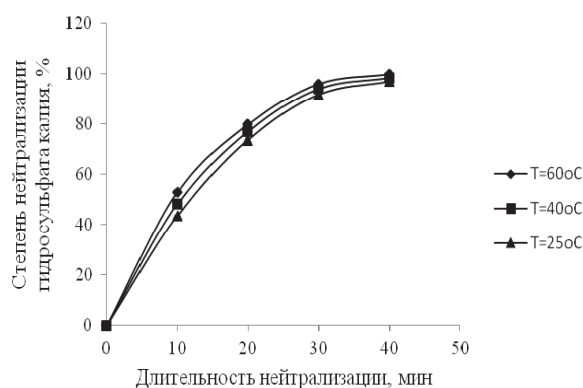


Рис. 8. Зависимости степени нейтрализации гидросульфата калия раствором аммиака от длительности процесса при различных температурах

Fig. 8. Dependence of neutralization degree of potassium hydrogen sulfate with the ammonia solution on the process duration at different temperatures

Степень нейтрализации гидросульфата калия раствором аммиака постепенно увеличивается (рис. 8). При этом в начальные интервалы времени интенсивность увеличения степени нейтрализации выше. При длительности нейтрализации 40 мин степень нейтрализации приближается к 100 %. Поэтому можно заключить, что 40 мин достаточно для проведения процесса нейтрализации гидросульфата калия раствором аммиака. Наибольшая степень нейтрализации достигнута при температуре 60 °С, однако степень нейтрализации незначительно увеличивается с ростом температу-

ры. Проводить процесс нейтрализации при температурах выше 60 °С не целесообразно в связи с увеличением потерь аммиака в растворе.

Рентгенофазовый анализ продукта, полученного при нейтрализации гидросульфата калия раствором аммиака, показал (рис. 9), что в результате взаимодействия гидросульфата калия с аммиаком в растворе образуется сульфат калия-аммония KNH_4SO_4 . Данный продукт можно использовать в качестве комплексного калийно-азотного удобрения.

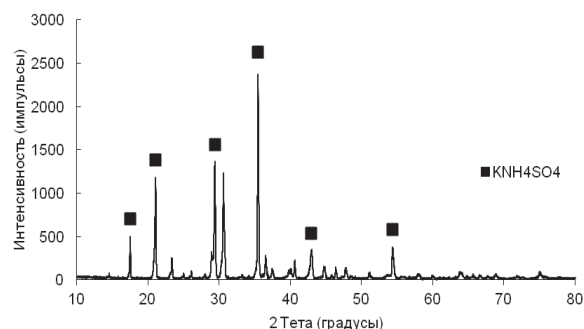


Рис. 9. Рентгенограмма продукта, полученного при нейтрализации гидросульфата калия раствором аммиака

Fig. 9. X-ray pattern of the product obtained at potassium hydrogen sulfate neutralization with the ammonia solution

Исследования характеристик полученного сульфата калия-аммония показали, что это удобрение хорошо растворимо в воде. К тому же сульфат калия-аммония обладает низкой гигроскопичностью и слеживаемостью, поэтому его можно производить в виде кристаллического продукта без введения антислеживающих добавок [22].

Выводы

1. Исследован процесс получения калийно-азотного сульфатного удобрения путем вакуумной конверсии хлорида калия серной кислотой с

последующей нейтрализацией полученного гидросульфата калия раствором аммиака. Установлено, что применение разряжения позволяет снизить температуру кипения реакционной смеси, температуру процесса конверсии, а также увеличить выход основных продуктов конверсии – гидросульфата калия и хлороводорода. Поскольку под разряжением процесс испарения воды протекает интенсивнее, то концентрация получаемой соляной кислоты снижается при увеличении разряжения.

2. Выявлено, что с увеличением концентрации серной кислоты в реакционной смеси выход гидросульфата калия и хлороводорода возрастает. Серная кислота в процессе конверсии может выступать в качестве водоотнимающего реагента, снижая при этом растворимость продуктов реакции. Поэтому процесс конверсии следует проводить при избытке серной кислоты. Чтобы избежать накопления серной кислоты в маточном растворе и потери сырья, избыток серной кислоты должен составлять не более чем 20 % от стехиометрии.
3. Установлено, что при нейтрализации гидросульфата калия раствором аммиака температура процесса незначительно влияет на степень нейтрализации гидросульфата калия. Продуктом нейтрализации KHSO_4 раствором аммиака является сульфат калия-аммония KNH_4SO_4 , который можно использовать в качестве комплексного калийно-азотного удобрения.
4. На основании проведенных исследований определены оптимальные параметры процессов конверсии хлорида калия серной кислотой ($T=90^\circ\text{C}$, остаточное давление – 40 кПа, соотношение $\text{H}_2\text{O}/\text{KCl}=1,5$, концентрация H_2SO_4 – 46 % мас.) и нейтрализации гидросульфата калия раствором аммиака ($T=60^\circ\text{C}$, $t=40$ мин) в технологии получения калийно-азотного сульфатного удобрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грабовенко В.А. Производство бесхлорных калийных удобрений. – Л.: Химия, 1980. – 256 с.
2. Глинка Н.Л. Общая химия. – Л.: Химия, 1985. – 702 с.
3. Томасзевска М. Предварительное исследование преобразования хлорида калия в сульфат калия, используя мембранный реактор // Журнал мембранной науки. – 2008. – № 5. – С. 14–18.
4. Способ конверсии хлорида металла в его сульфат: пат. Рос. Федерация № 2489502; заявл. 29.05.2012; опубл. 10.08.2013, Бюл. № 4. – 8 с.
5. Метод получения сульфата калия из хлорида калия: пат. США № 8409542; заявл. 14.06.2011; опубл. 02.04.2013, Бюл. № 5. – 3 с.
6. Процесс для получения сульфатных калийных удобрений и сульфатов других металлов: пат. США № 6365122; заявл. 22.06.1998; опубл. 02.04.2002, Бюл. № 9. – 4 с.
7. Кашкаров О.Д., Соколов И.Д. Технология калийных удобрений. – М.: Химия, 1978. – 354 с.
8. Процесс получения сульфата калия и хлороводородной кислоты: пат. Япония № 2040109; заявл. 09.04.1991; опубл. 11.10.1991, Бюл. № 12 – 5 с.
9. Метод получения сульфата калия: пат. США № 6315976; заявл. 14.06.1999; опубл. 13.09.2001, Бюл. № 8. – 4 с.
10. Химический процесс получения хлороводорода и бесхлоридных комплексных калийных сульфатных удобрений или сульфатов других металлов: пат. США № 887776; заявл. 13.09.2010; опубл. 02.08.2011, Бюл. № 8. – 6 с.
11. Шестаков В.В. Технология получения бесхлоридных калийно-фосфорного и калийно-магниевого удобрений на основе жидкофазной конверсии хлорида калия серной кислотой: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1990. – 15 с.
12. Способ получения сульфата калия: пат. № 2144501 Рос. Федерация № 98117919/12; заявл. 01.10.1998; опубл. 20.01.2000, Бюл. № 6. – 5 с.
13. Справочник. Растворимость неорганических веществ в воде / под ред. А.Н. Киргина – Л.: Химия, 1972. – 248 с.
14. Горшков В.И., Кузнецов И.А. Основы физической химии. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 408 с.

15. Справочник по растворимости водно-солевых систем / под ред. А.Д. Пельша. – Л.: Химия, 1973. – 987 с.
16. Шевелева О.Г., Рупчева В.А., Пойлов В.З. Исследование процесса нейтрализации гидросульфата калия // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 10. – С. 157–164.
17. Справочник по растворимости. Тройные и многокомпонентные системы, образованные неорганическими веществами / под ред. В.В. Кафаров – Л.: Наука, 1970. – 1222 с.
18. ГОСТ 4204-77. Реактивы. Кислота серная. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 2014. – 30 с.
19. Исследование смачиваемости пылевидного хлорида калия / О.А. Федотова, М.В. Черепанова, И.С. Потапов, В.З. Пойлов // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 1. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1558> (дата обращения: 15.02.2016).
20. Исследование процесса конверсии хлорида калия серной кислотой под вакуумом / О.Г. Стефанцова, Г.Р. Гайнанова, В.А. Рупчева, В.З. Пойлов // Химия. Экология. Биотехнология: тезисы докладов XVII Региональной научно-практической конференции студентов и молодых ученых. – Пермь, 2015. – С. 26–28.
21. ГОСТ 9-92. Аммиак водный технический. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 2002. – 24 с.
22. Стефанцова О.Г., Рупчева В.А., Пойлов В.З. Исследование процесса получения и свойств двойного сульфата калия и аммония // Менделеев-2015: тезисы докладов IX Международной конференции студентов и молодых ученых. – Санкт-Петербург, 2015. – С. 131.

Поступила 21.02.2016 г.

Информация об авторах

Шевелева О.Г., аспирант кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Рупчева В.А., кандидат технических наук, доцент кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Пойлов В.З., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 661.152.32

PRODUCTION OF POTASSIUM-NITROGEN SULFATE FERTILIZER BY CONVERSION OF POTASSIUM CHLORIDE WITH SULFURIC ACID

Olga G. Sheveleva¹,
Olgatnv07@rambler.ru

Vera A. Rupcheva¹,
Poilov@pstu.ru

Vladimir Z. Poylov¹,
Poilov@pstu.ru

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

The relevance of the research is caused by the necessity to obtain complex potassium sulfate fertilizers, which do not contain chloride ion. The accumulation of the latter in soil leads to lower yields and increases the level of soil salinity.

The main aim of the work is to investigate potassium chloride conversion with sulfuric acid and potassium hydrogensulfate neutralization stages by ammonia solution in production of potassium-nitrogen sulfate fertilizer; to define optimal parameters of these stages.

The methods used in the study: theoretical analysis of the processes, modeling of technological process in laboratory conditions, definition of hydrochloric acid concentration by chloride ion argentometric titration, study of changes in the content of ion HSO_4^- by titration of product with sodium hydroxide, X-ray analysis of product, obtained by neutralization.

The results. The authors have studied the production of potassium-nitrogen sulfate fertilizer by vacuum potassium chloride conversion with sulfuric acid with further neutralization of the obtained potassium hydrogensulfate by ammonia solution. At conversion it was determined that the residual pressure and sulfuric acid concentration in reaction mixture influence the output of basic products – potassium hydrogen sulfate and hydrogen chloride, and the concentration of the obtained hydrochloric acid as well. Studying the potassium hydrogensulfate neutralization with the ammonia solution the authors determined the dependence of neutralization degree on the process duration at 25, 40 and 60 °C.

The findings. It was ascertained that application of rarefaction at the potassium chloride conversion stage with sulfuric acid allows reducing the reaction mixture boiling temperature, thereby decreasing the conversion temperature, and increasing as well the output of the basic conversion products – potassium hydrogensulfate and hydrogen chloride. It was revealed that the output of potassium hydrogensulfate and hydrogen chloride increases with the growth of sulfuric acid concentration in reaction mixture. The conversion should be carried out at sulfuric acid excess from stoichiometry, as the sulfuric acid, being the dehydrating agent, binds a part of water and reduces the solubility of reaction products. Application of sulfuric acid excess more than 20 % of stoichiometric amount is inappropriate, as it leads to accumulation of sulfuric acid in mother liquor and raw material losses. Sulfate of potassium and ammonium KNH_4SO_4 , is the product of potassium hydrogensulfate neutralization by ammonia solution. It can be used as a complex potassium and nitrogen fertilizer. Based on the carried out researches the authors determined the optimal parameters of potassium chloride conversion with sulfuric acid ($T=90$ °C, residual pressure 40 kPa, ratio $\text{H}_2\text{O}/\text{KCl}=1,5$, concentration H_2SO_4 46 wt. %) and potassium hydrogensulfate neutralization with ammonia solution ($T=60$ °C, $t=40$ minutes) in technology for obtaining potassium and nitrogen sulfate fertilizer.

Key words:

Potassium and nitrogen sulfate fertilizer, potassium hydrogen sulfate, sulfuric acid, potassium chloride, ammonia, sulfate of potassium and ammonium, conversion, neutralization.

REFERENCES

- Grabovenko V.A. *Proizvodstvo beskhloridnykh kaliynykh udobreniy* [Production of chlorate-free potassium fertilizers]. Leningrad, Khimiya Publ., 1980. 256 p.
- Glinka N.L. *Obshchaya khimiya* [General chemistry]. Leningrad, Khimiya Publ., 1985. 702 p.
- Tomaszewska M. Predvaritelnoe issledovanie konversii khlorida kaliya v sulfat kaliya, ispolzuya membranny reaktor [Preliminary studies on conversion of potassium chloride into potassium sulfate using membrane reactor]. *Journal of Membrane Science*, 2008, vol. 317, no. 5, pp. 14–18.
- Kasikov A.G. *Sposob konversii khlorida metalla v ego sulfat* [The method of metal chloride conversion with sulfate obtain]. Patent RF, no. 2489502, 2013.
- Jean-Marc Lalancette, David Lemieux, Bertrand Dubreuil. *Metod polucheniya sulfata kaliya iz khlorida kaliya* [Method for production of potassium sulfate from potassium chloride]. Patent US, no. 8409542, 2013.
- William J., Keith D., Timothy G. *Protsess polucheniya sulfatnogo kaliynogo udobreniya i sulfatov drugikh metallov* [Process for manufacturing potassium sulfate fertilizer and other metal sulfates]. Patent US, no. 6365122, 2002.
- Kashkarov O.D., Sokolov I.D. *Tekhnologiya kaliynykh udobreniy* [The technology of potassium fertilizers]. Moscow, Khimiya Publ., 1978. 354 p.
- Khiguchi J. *Protsess polucheniya sulfata kaliya i khlorovodorodnoy kisloty* [Process for production potassium sulfate and hydrochloric acid]. Patent Japan, no. 2040109, 1991.
- Phinney G., Robin V. *Metod polucheniya sulfata kaliya* [Method of producing potassium sulfate]. Patent US, no. 6315976, 2001.
- Finkelshstein L. *Khimicheskiy protsess polucheniya khlorovodoroda i beskhloridnykh kompleksnykh kaliynykh sulfatnykh udobreniy ili sulfatov drugikh metallov* [Chemical process to produce hydrogen chloride and chloride-free compound potassium sulfate fertilizers or other metal sulfates]. Patent US, no. 887776, 2011.
- Shestakov V.V. *Tekhnologiya polucheniya beskhloridnykh kaliyno-fosforynykh i kaliyno-magnievykh udobreniy na osnove zhidko*

- faznoy konversii khlorida kaliya sernoy kislotoy* [Dis. Kand. nauk [The production technology of the chlorate-free potassium-phosphorus and potassium-magnesium fertilizers by conversion of potassium chloride with sulfuric acid. Cand. Diss]. Moscow, 1990. 15 p
12. Timofeev V.I., Buksha Yu.V., Safrygin Yu.A. *Sposob polucheniya sulfata kaliya* [The method of obtaining potassium sulfate]. Patent RF, no. 2144501, 2000.
 13. Kirginev A.N. *Spravochnik. Rastvorimost neorganicheskikh veshchestv v vode* [The catalog. Solubility of inorganic substances in water]. Leningrad, Khimiya Publ., 1972. 248 p.
 14. Gorshkov V.I., Kuznetsov I.A. *Osnovy fizicheskoy khimii* [The fundamentals of physical chemistry]. Moscow, Binom. Laboratoriya znaniy Publ., 2014. 408 p.
 15. Pelsha A.D. *Spravochnik po rastvorimosti vodno-solevykh sistem* [The catalog of water-salt systems solubility]. Leningrad, Khimiya Publ., 1973. 987 p.
 16. Sheveleva O.G., Rupcheva V.A., Poylov V.Z. Study of potassium hydrogensulfate neutralization. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 10, pp. 157–164.
 17. Kafarov V.V. *Spravochnik po rastvorimosti. Troynnye i mnogokomponentnye sistemy, obrazovannye neorganicheskimi veshchestvami* [The catalog of solubility. Triple and multi-component systems, formed from inorganic substances]. Leningrad, Nauka Publ., 1970. 1222 p.
 18. GOST 4204-77. *Reaktivy. Kislota sernaya. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 4204-77. Reagents. Sulphuric acid. Technical conditions]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 2014. 30 p.
 19. Fedotova O.A., Cherepanova M.V., Potapov I.S., Poylov V.Z. Research of process of wettability of pulverulent potassium chloride containing the admixtures of flotoreagents. *Engineering Journal of Don*, 2013, no 1. Available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1558> (accessed 15 February 2016).
 20. Stefantsova O.G., Gainanova G.R., Rupcheva V.A., Poylov V.Z. Issledovanie protsessa konversii khlorida kaliya sernoy kislotoy pod vakuomom [Research of potassium chloride conversion with sulfuric acid in the vacuum]. *Tezisy dokladov XVII Regionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov i molodykh uchennykh. Khimiya. Ekologiya. Biotekhnologiya* [Proc. of the XVII regional scientific conference of students and young researches. Chemistry. Ecology. Biotechnology]. Perm, 2015. pp. 26–28.
 21. GOST 9-92. *Ammiak vodny tekhnicheskij. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 9-92. Ammonia water technical. Technical conditions]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 2002. 24 p.
 22. Stefantsova O.G., Rupcheva V.A., Poylov V.Z. Issledovanie protsessa polucheniya i svoystv dvoynogo sulfata kaliya i ammoniya [Study of producing and properties of double potassium sulfate and ammonium]. *Tezisy dokladov IX Mezhdunarodnoy konferentsii studentov i molodykh uchennykh. Mendeleev-2015* [Proc. of the IX International conference of students and young researches. Mendeleev-2015]. St-Petersburg, 2015. pp. 131.

Received: 21 February 2016.

Information about the authors

Olga G. Sheveleva, Dr. Sc., Head of the Laboratory, Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Vera A. Rupcheva, Cand. Sc., assistant professor, Perm National Research Polytechnic University.

Vladimir Z. Poylov, Dr. Sc., professor, Head of the Department, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 621.039.84

РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПРАВОК НА РЕЗОНАНСНОЕ САМОЭКРАНИРОВАНИЕ АКТИВАЦИОННЫХ ИНДИКАТОРОВ ИЗ ЗОЛОТА И ТАНТАЛА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ

Алейников Юрий Владимирович¹,
aleinikov@nnc.kz

Попов Юрий Анатольевич¹,
Popov@nnc.kz

Прозорова Ирина Валентиновна¹,
Prozorova@nnc.kz

¹ Институт атомной энергии НЯЦ РК,
Казахстан, 711100, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 10.

Актуальность работы обусловлена необходимостью оценить факторы резонансного самоэкранирования в активационных индикаторах из золота и тантала, используемых при проведении нейтронно-активационного анализа однокомпараторным методом k_0 -стандартизации. При облучении активационных индикаторов в поле надтепловых нейтронов ядерного реактора происходит возмущение потока из-за поглощения нейтронов внутри материала индикатора. Этот эффект может быть очень важным, особенно если у материала индикатора имеются резонансы в этой области энергий. Для учета эффекта возмущения нейтронного потока при активации должен быть рассмотрен фактор резонансного самоэкранирования G_{res} . Этот фактор зависит от геометрии и размера образца, а также от физических и ядерных свойств изотопа. Предложена кривая, которая хорошо согласуется с экспериментальными и вычисленными литературными значениями.

Цель работы: определение поправок на резонансное самоэкранирование активационных индикаторов при облучении в реакторе.
Методы исследования: моделирование и выполнение нейтронно-физических расчетов скорости реакции активации с помощью программы MCNP5 в зависимости от толщины индикаторов и ядерной концентрации изотопов; подбор аналитических зависимостей для расчета факторов резонансного самоэкранирования.

Результаты. Представлены результаты нейтронно-физических расчетов факторов резонансного самоэкранирования для активационных индикаторов из золота и тантала, используемых в качестве активационных индикаторов при нейтронном облучении. Получены зависимости поправочных коэффициентов от толщины индикатора, аналитические формулы для индикатора и зависимости скорости реакций от концентрации изотопов. Результаты расчетов будут использованы при проведении нейтронно-активационного анализа конструкционных материалов ядерной техники однокомпараторным методом k_0 -стандартизации с использованием исследовательского реактора ИВГ.1М.

Ключевые слова:

Фактор резонансного самоэкранирования, активационный индикатор, скорость реакции, код MCNP, нейтронно-физические расчеты.

Компараторный метод k_0 -стандартизации инструментального нейтронно-активационного анализа (k_0 -ИНАА) требует предварительного знания некоторых характеристик поля нейтронов для определения эффективного поперечного сечения (n, γ) реакций на изотопах элементов-аналитов. При определении потока или спектра надтепловых нейтронов активационным методом используются активационные индикаторы, спектральная чувствительность которых обусловлена наличием резонансной структуры энергетической зависимости поперечного сечения. При определении скорости (n, γ) реакции на ядрах элемента-мишени индикатора, когда эпитепловой энергетический интервал сечения реакции элемента содержит резонансы, результат измерения средней скорости реакции активации может быть искажен эффектом самоэкранирования. Физический смысл эффекта самоэкранирования заключается в том, что по мере проникновения нейтронов в глубину индикатора происходит изменение спектра

нейтронов, падающих на индикатор. При этом спектр нейтронов оказывается все более и более обедненным нейтронами с резонансными энергиями. В том случае, когда в рассматриваемый энергетический интервал попадают один или несколько особо сильных резонансов, внешние слои индикатора эффективно экранируют всю остальную массу индикатора от нейтронов соответствующих энергий даже при сравнительно небольших толщинах индикатора. Вследствие этого результат измерения скорости реакции начинает зависеть от толщины индикатора.

Целью данной работы являлось определение поправок на резонансное самоэкранирование активационных индикаторов (АИ) при нейтронном облучении. В результате проведенных расчетных исследований были определены зависимости скорости реакции (n, γ) для АИ из золота и тантала от толщины АИ, ядерной концентрации и энергии нейтронов. Получены значения факторов резонансного самоэкранирования в материалах АИ.

Объектом исследования являлись АИ из золота (^{197}Au) и тантала (^{181}Ta), используемые при нейтронно-активационном анализе. Основные параметры АИ приведены в табл. 1: A – молярная масса, P – плотность, θ – процентное содержание изотопа в смеси, E_{res} – энергия резонансного пика, $\sigma_{\text{tot}}(E_{\text{res}})$ – максимальное значение резонансного сечения (высота резонансного пика), $\Gamma\gamma$ – ширина каналов реакции (n, γ), Γ_n – ширина каналов реакции (n, n), I – значение эффективного резонансного интеграла [1].

В расчетах АИ имеют форму диска различной высоты диаметром 10 мм. АИ облучается изотропным источником промежуточных нейтронов реакторного спектра.

Таблица 1. Параметры изотопов, используемых в качестве АИ для k0-ИНАА

Table 1. Isotopes parameters used as AI for k0-ИНАА

| Изотоп Isotope | A (г/моль $^{-1}$) | P (г/см $^{-3}$) | θ (%) | E_{res} (эВ) | $\sigma_{\text{tot}}(E_{\text{res}})$ (барн)* | $\Gamma\gamma$ (эВ) | Γ_n (эВ) | $\Gamma\gamma/I$ (%) |
|-------------------|-----------------------|---------------------|--------------|-----------------------|--|---------------------|-----------------|----------------------|
| ^{197}Au | 196,97 | 19,32 | 100 | 4,91 | 30770 | 0,1225 | 0,0152 | 89,0 |
| | | | | 4,28 | 13969 | 0,053 | 0,0039 | 93,1 |
| ^{181}Ta | 180,95 | 16,65 | 100 | 10,34 | 4052 | 0,055 | 0,0047 | 92,3 |
| | | | | 13,95 | 792 | 0,052 | 0,0010 | 98,1 |

*барн (barn)= 10^{-24} см 2

Нейтронно-физические расчеты были проведены с помощью программы MCNP5 [2, 3], относящейся к числу универсальных программ для решения задач переноса излучения в произвольной трехмерной геометрии с библиотеками констант ENDF/B-5, 6. При расчетах коэффициентов самоэкранирования для резонансных АИ вводились следующие допущения: АИ представляет собой тонкий диск; направление падения нейтронов на поверхность АИ изотропное. Расчетная модель представляет собой систему источник–АИ (рис. 1).

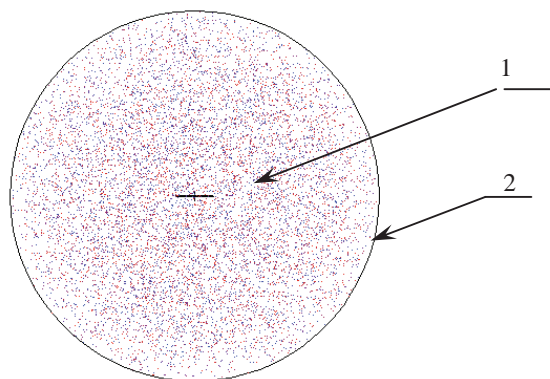


Рис. 1. Расчетная модель системы источник–АИ: 1) АИ; 2) нейтроны реакторного спектра

Fig. 1. Calculation model of AI (activation indicators) – source system: 1) AI; 2) reactor spectrum neutrons

Самопоглощение и рассеяние нейтронов в АИ представляют собой эффекты, определяющие фактор резонансного самоэкранирования $G_{\text{res}}(t)$.

На первом этапе расчетных исследований определялись зависимости $G_{\text{res}}(t)$ от толщины АИ с помощью программы MCNP5. Далее для аналитических зависимостей, приведенных в литературных источниках [4–18], были подобраны коэффициенты таким образом, чтобы полученные с помощью аналитического выражения и вычисленные с помощью программы MCNP5 зависимости $G_{\text{res}}(t)$ имели наибольшее совпадение.

Аналитическая зависимость фактора резонансного самоэкранирования $G_{\text{res}}(t)$ от толщины АИ имеет следующий вид:

$$G_{\text{res}}(t) = \frac{1}{1 + (t/a)^b}, \quad (1)$$

где t – толщина индикатора, мм; для ^{197}Au $a=0,0135$; $b=0,75$; для ^{181}Ta $a=0,023$; $b=0,78$.

На рис. 2 и 3 приведены результаты расчета зависимости фактора резонансного самоэкранирования $G_{\text{res}}(t)$ от толщины АИ из золота и тантала соответственно, а также данные из литературных источников.

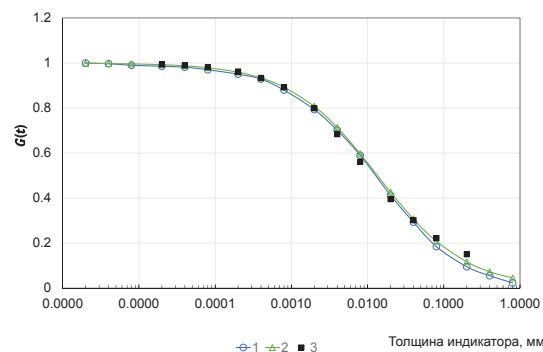


Рис. 2. Зависимость фактора резонансного самоэкранирования $G_{\text{res}}(t)$ от толщины Au-индикатора: 1) расчет по программе MCNP5; 2) расчет аналитическим методом; 3) литературные данные [19]

Fig. 2. Dependence of self-shielding factor $G_{\text{res}}(t)$ on Au-indicator thickness: 1) calculated by the MCNP5; 2) calculated by the analytical method; 3) published data [19]

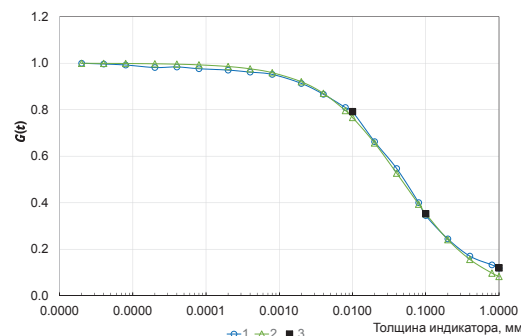


Рис. 3. Зависимость фактора резонансного самоэкранирования $G_{\text{res}}(t)$ от толщины Ta-индикатора: 1) расчет по программе MCNP5; 2) расчет аналитическим методом; 3) литературные данные [20]

Fig. 3. Dependence of self-shielding factor $G_{\text{res}}(t)$ on Ta-indicator thickness: 1) calculated by the MCNP5; 2) calculated by the analytical method; 3) published data [20]

Численные значения скорости реакции $R(n, \gamma)$ и расчетные значения фактора резонансного самоэкранирования для индикаторов из золота и тантала приведены в табл. 2 и 3 соответственно. Скорость реакций $R(n, \gamma)$ оценена на один нейтрон источника.

Таблица 2. Результаты расчетов для Au-индикатора

Table 2. Results of calculations for Au-indicator

| Толщина, мм Thickness, mm | $R(n, \gamma)$, см ⁻³ ·с ⁻¹ | $G_{res}(t)$ MCNP | $G_{res}(t)$, аналит. метод analytical method | $G_{res}(t)$ [4] |
|------------------------------|---|----------------------|--|---------------------|
| 2,0·10 ⁻⁶ | 3,13·10 ⁻¹ | 1 | 1 | – |
| 4,0·10 ⁻⁶ | 3,10·10 ⁻¹ | 0,9967 | 0,9977 | – |
| 8,0·10 ⁻⁶ | 3,12·10 ⁻¹ | 0,9902 | 0,9962 | – |
| 2,0·10 ⁻⁵ | 3,11·10 ⁻¹ | 0,9855 | 0,9925 | 0,9936 |
| 4,0·10 ⁻⁵ | 3,10·10 ⁻¹ | 0,9814 | 0,9874 | 0,9893 |
| 8,0·10 ⁻⁵ | 3,07·10 ⁻¹ | 0,9701 | 0,9791 | 0,9815 |
| 0,0002 | 3,01·10 ⁻¹ | 0,9502 | 0,9592 | 0,9621 |
| 0,0004 | 2,92·10 ⁻¹ | 0,9283 | 0,9333 | 0,9335 |
| 0,0008 | 2,79·10 ⁻¹ | 0,8797 | 0,8927 | 0,8927 |
| 0,002 | 2,50·10 ⁻¹ | 0,7932 | 0,8072 | 0,7993 |
| 0,004 | 2,14·10 ⁻¹ | 0,7014 | 0,7134 | 0,6836 |
| 0,008 | 1,76·10 ⁻¹ | 0,5898 | 0,5968 | 0,5615 |
| 0,02 | 1,24·10 ⁻¹ | 0,4128 | 0,4268 | 0,3952 |
| 0,04 | 9,45·10 ⁻² | 0,2936 | 0,3069 | 0,302 |
| 0,08 | 6,95·10 ⁻² | 0,1844 | 0,2084 | 0,2219 |
| 0,2 | 4,71·10 ⁻² | 0,0949 | 0,1169 | 0,1505 |
| 0,4 | 3,25·10 ⁻² | 0,0552 | 0,0730 | – |
| 0,8 | 1,71·10 ⁻² | 0,0231 | 0,0447 | – |

Таблица 3. Результаты расчетов для Ta-индикатора

Table 3. Results of calculations for Ta-indicator

| Толщина, мм Thickness, mm | $R(n, \gamma)$, см ⁻³ ·с ⁻¹ | $G_{res}(t)$ MCNP | $G_{res}(t)$, аналит. метод analytical method | $G_{res}(t)$ [5] |
|------------------------------|---|----------------------|--|---------------------|
| 2,0·10 ⁻⁶ | 1,37·10 ⁻¹ | 1,0000 | 0,9996 | |
| 4,0·10 ⁻⁶ | 1,36·10 ⁻¹ | 0,9967 | 0,9993 | |
| 8,0·10 ⁻⁶ | 1,36·10 ⁻¹ | 0,9923 | 0,9988 | |
| 2,0·10 ⁻⁵ | 1,35·10 ⁻¹ | 0,9815 | 0,9976 | |
| 4,0·10 ⁻⁵ | 1,34·10 ⁻¹ | 0,9840 | 0,9959 | |
| 8,0·10 ⁻⁵ | 1,34·10 ⁻¹ | 0,9764 | 0,9930 | – |
| 0,0002 | 1,33·10 ⁻¹ | 0,9705 | 0,9858 | |
| 0,0004 | 1,32·10 ⁻¹ | 0,9617 | 0,9759 | |
| 0,0008 | 1,30·10 ⁻¹ | 0,9520 | 0,9593 | |
| 0,002 | 1,25·10 ⁻¹ | 0,9133 | 0,9202 | |
| 0,004 | 1,19·10 ⁻¹ | 0,8665 | 0,8705 | |
| 0,008 | 1,11·10 ⁻¹ | 0,8095 | 0,7965 | |
| 0,01 | 1,08·10 ⁻¹ | 0,7912 | 0,7668 | 0,792 |
| 0,02 | 9,08·10 ⁻² | 0,6630 | 0,6569 | |
| 0,04 | 7,49·10 ⁻² | 0,5474 | 0,5272 | – |
| 0,08 | 5,48·10 ⁻² | 0,4005 | 0,3937 | |
| 0,1 | 4,72·10 ⁻² | 0,3447 | 0,3530 | 0,353 |
| 0,2 | 3,35·10 ⁻² | 0,2446 | 0,2412 | |
| 0,4 | 2,33·10 ⁻² | 0,1705 | 0,1562 | – |
| 0,8 | 1,82·10 ⁻² | 0,1327 | 0,0973 | |
| 1 | 1,62·10 ⁻² | 0,1186 | 0,0830 | 0,120 |

На втором этапе расчетных исследований определялся фактор резонансного самоэкранирования как отношение скорости реакции в реальном об-

разце к скорости реакции в «бесконечно разбавленном» образце.

Фактор резонансного самоэкранирования $G_{res}(R)$ в диске радиуса R определяется выражением

$$G_{res}(R) = \frac{\int_{E_1}^{E_2} \Phi_0(E) \sigma_{n\gamma}(E) dE}{\int_{E_1}^{E_2} \Phi_0(E) \sigma_{n\gamma}(E) dE}, \quad (2)$$

где $\Phi_0(E)$ – невозмущенный поток эпитепловых нейтронов на единичный интервал энергии внутри бесконечно разбавленного образца; $\Phi(E)$ – представляет собой возмущенный поток внутри реального образца; $\sigma_{n\gamma}(E)$ – сечение реакции, где E_1 и E_2 – верхний и нижний предел энергии резонансов соответственно.

Для возмущенного потока нейтронов $\Phi(E)$ в расчете принято полное сечение реакции, которое учитывает рассеяние нейтронов в образце. При расчете скорости реакции для невозмущенного потока нейтронов задается фиктивная концентрация $\rho_0 \cdot 10^{-6}$ для моделирования «бесконечного разведения», при этом ρ_0 представляет собой значение концентрации для реального образца.

Для заданного радиуса R энергозависимый фактор резонансного самоэкранирования может быть определен как

$$G_r(E) = \frac{RR(E, \rho_0)}{RR(E, 10^{-6} \rho_0)}, \quad (3)$$

где $RR(E, \rho_0)$ и $RR(E, 10^{-6} \rho_0)$ – скорость реакции для концентраций ρ_0 и $10^{-6} \rho_0$ соответственно.

В общем случае фактор резонансного самоэкранирования зависит от плотности материала (ядерной концентрации), атомной массы, наличия примесей, толщины индикатора и существенно от резонансных сечений.

Для того чтобы определить концентрацию, соответствующую «бесконечному разбавлению», при проведении расчета скорости реакции для невозмущенного потока нейтронов, была изучена зависимость скорости реакции от ядерной концентрации N . График на рис. 4 показывает изменение скорости реакции на ядрах золота (этот материал имеет высокое резонансное сечение) и ядрах тантала в зависимости от концентрации. На графике видно, что скорость реакции увеличивается при уменьшении концентрации и ее насыщение для золота происходит при $\rho = \rho / \rho_0 \leq 10^{-5}$, для тантала при $\rho = \rho / \rho_0 \leq 10^{-4}$. По этой причине во всех последующих расчетах концентрации для бесконечного разбавления предполагались $\rho = \rho_0 \cdot 10^{-6}$.

Таким образом, чтобы оценить зависимость скорости реакции $R(n, \gamma)$ от концентрации изотопа, была задана концентрация для «бесконечного» разбавления, равная $\rho = \rho_0 \cdot 10^{-6}$ (ρ_0 – нормальная концентрации изотопа). На рис. 5 приведены результаты расчета скоростей реакций для двух значений концентрации золота: $\rho = \rho_0 \cdot 10^{-6}$ и ρ_0 . На графике (рис. 6) представлено изменение скорости реакции на атомах тантала в зависимости от концентрации.

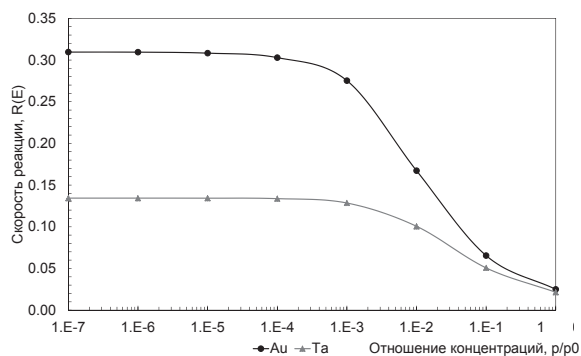


Рис. 4. Зависимость скорости реакции $R(E)$ от концентрации для Au- и Ta-индикаторов

Fig. 4. Dependence of the reaction rate $R(E)$ on concentration of Au and Ta indicators

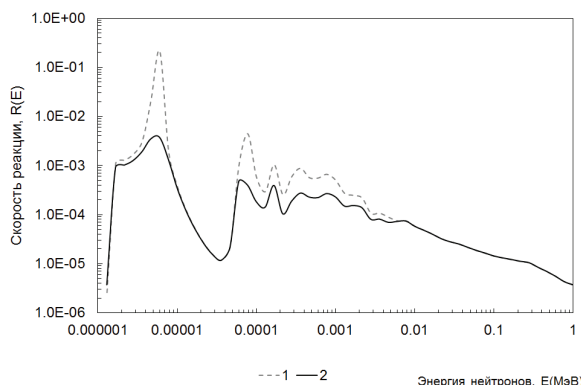


Рис. 5. Зависимость скорости реакции $R(n, \gamma)$ от энергии нейтронов для Au-индикатора: 1) концентрация $\rho = \rho_0 \cdot 10^{-6}$; 2) концентрация ρ

Fig. 5. Dependence of the reaction rate $R(n, \gamma)$ on neutron energy for Au-indicator: 1) concentration $\rho = \rho_0 \cdot 10^{-6}$; 2) concentration ρ

На графиках четко просматривается эффект самоэкранирования, показаны возмущенные и невозмущенные скорости реакций, для бесконечного

разбавленного образца видны хорошо выраженные пики в области резонансов.

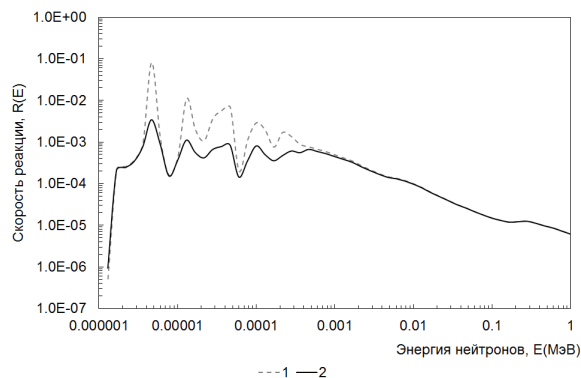


Рис. 6. Зависимость скорости реакции $R(n, \gamma)$ от энергии нейтронов для Ta-индикатора: 1) концентрация $\rho = \rho_0 \cdot 10^{-6}$; 2) концентрация ρ

Fig. 6. Dependence of the reaction rate $R(n, \gamma)$ on neutron energy for Ta-indicator: 1) concentration $\rho = \rho_0 \cdot 10^{-6}$; 2) concentration ρ

Заключение

Проведены расчётные исследования факторов резонансного самоэкранирования в активационных индикаторах из золота и тантала, используемых при нейтронно-активационном анализе. В ходе исследования:

- вычислены скорости реакции (n, γ) для активационных индикаторов из золота и тантала;
- определены зависимости поправочных коэффициентов самоэкранирования от толщины индикатора;
- для аналитического метода подобраны формулы для расчета поправочных коэффициентов;
- приведены изменения скорости реакции в зависимости от концентрации изотопов, показан эффект самоэкранирования.

Результаты будут использованы при проведении нейтронно-активационного анализа конструкционных материалов ядерной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jagodish K. Tuli. Nuclear Wallet cards (sixth ed.): National Nuclear Data Center for the U.S. Nuclear Data Program: Brookhaven National Laboratory // New York, Upton. – 2000. URL: <http://www.nndc.bnl.gov/wallet/wccurrent.html> (дата обращения: 10.02.2016).
2. X-5 Monte Carlo Team. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 5. Vol. I: Overview and Theory. Los Alamos National Laboratory Report: LA-UR-03-1987. – 2003 (Revised 10/3/05). URL: <http://www.nucleonica.net/wiki/images/8/89/MCNPvolI.pdf> (дата обращения: 10.02.2016).
3. MacFarlane R.E. New Thermal Neutron Scattering Files for ENDF/B-VI Release 2 (Новые файлы рассеяния тепловых нейтронов для второго выпуска ENDF/B-VI): Report LA-12639-MS (ENDF-356) UC-413: Los Alamos National Laboratory. – 1994. URL: <http://t2.lanl.gov/nis/publications/methods.pdf> (дата обращения 10.02.2016).
4. Goncalves I.F., Martinho E., Salgado J. Extension to cylindrical samples of the universal curve of resonance neutron self-shielding factors // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2004. – № 213. – P. 186–188.
5. Goncalves I.F., Martinho E., Salgado J. Monte Carlo calculation of epithermal neutron resonance self-shielding factors in foils of different materials // Applied Radiation and Isotopes. – 2002. – № 56. – P. 945–951.
6. Salgado J., Martinho E., Goncalves I.F. Epithermal neutron self-shielding factors in foils for collimated beams // Applied Radiation and Isotopes. – 2004. – V. 60. – P. 677–681.
7. Furcia H., Arribère M., Ribeiro Guevara S. Self-shielding corrections in cylindrical samples in gamma spectrometry with germanium well-type detectors // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2013. – V. 705. – P. 132–139.
8. Krar M.E., Milad K.F. Direct mathematical calculation of the self-shielding factor for cylindrical radioactive sources // Journal of Taibah University for Science. – 2015. – V. 2. – P. 62–69.
9. Safarzadeh O., Shirani A.S., Minuchehr A. Resonance self-shielding calculation using sub-group method and ABC algorithm // Progress in Nuclear Energy. – 2015. – V. 78. – P. 303–309.

10. Tzika F., Stamatelatos I.E. Thermal neutron self-shielding correction factors for large sample instrumental neutron activation analysis using the MCNP code // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2004. – V. 213. – P. 177–181.
11. Large Sample Neutron Activation Analysis: correction for neutron and gamma attenuation / F. Tzika, I.E. Stamatelatos, J. Kafel-Ezra, P. Bode // Nukleonika. – 2004. – V. 49 (1). – P. 115–121.
12. Nasrabadia M.N., Jalalib M., Mohammadi A. Calculation of thermal neutron self-shielding correction factors for aqueous bulk sample prompt gamma neutron activation analysis using the MCNP code // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section. – 2007. – V. 263 (2). – P. 473–476.
13. Quantitative evaluation of nuclide density distribution in a substance by neutron resonance absorption transmission method / H. Hasemi, M. Harada, T. Kai, H. Sato, M. Ooi, M. Segawa, T. Shinohara, K. Kino, T. Kamiyama, Y. Kiyonagi // Physics Procedia. – 2014. – V. 60. – P. 244–253.
14. Lindstrom R.M., Fleming R.F. Neutron Self-Shielding Factors for Simple Geometries // Chem. Anal. – 2008. – V. 53. – P. 855–859.
15. Martinho E., Goncalves I.F., Salgado J. Universal curve of epithermal neutron resonance self-shielding factors in foils, wires and spheres // Applied Radiation and Isotopes. – 2003. – V. 58. – P. 371–375.
16. Yamamoto H., Yamamoto K. Self-Shielding Factors for Resonance Foils // Journal of Nuclear Science and Technology. – 1965. – V. 42. – P. 421–424.
17. Determination of Neutron Fluxes and Spectrum Shaping Factors in Irradiation Sites of Ghana's Miniature Neutron Source Reactor (MNSR) by Activation Method after Compensation of Loss of Excess Reactivity / R.B.M. Sogbadji, B.J.B. Nyarko, E.H.K. Akaho, R.G. Abrefah // World Journal of Nuclear Science and Technology. – 2011. – V. 1. – P. 50–56.
18. Tsubone I., Nakajima Y., Kanda Y. Resonance Parameters of Tantalum-181 in Neutron Energy Range from 100 to 4,300 eV // Journal of Nuclear Science and Technology. – 1987. – V. 24. – P. 975–987.
19. Ломакин С.С., Петров В.И., Самойлов П.С. Радиометрия нейтронов активационным методом. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 144 с.
20. Salgado J., Martinho E., Goncalves I.F. The calculation of neutron self-shielding factors of a group of isolated resonance // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2004. – V. 260 (2). – P. 317–320.

Поступила 11.02.2016 г.

Информация об авторах

Алейников Ю.В., начальник лаборатории физики реакторных установок Института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

Попов Ю.А., заместитель начальника лаборатории физики реакторных установок Института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

Прозорова И.В., начальник группы лаборатории физики реакторных установок Института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

UDC 621.039.84

CALCULATED DETERMINATION OF CORRECTIONS FOR RESONANCE SELF-SHIELDING OF ACTIVATION GOLD/TANTALUM DETECTORS AT IRRADIATION

Yury V. Aleynikov¹,

aleynikov@nnc.kz

Yury A. Popov¹,

Popov@nnc.kz

Irina V. Prozorova¹,

Prozorova@nnc.kz

¹ Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan, 10, Krasnoarmeyskaya street, Kurchatov, 711100, Republic of Kazakhstan.

The relevance of the discussed issue is caused by the need to evaluate the self-shielding factors in activation gold/tantalum indicators used while conducting Instrumental Neutron Activation Analysis by single-limit comparative method of k_0 -standartization. At irradiation of activation indicators the flux perturbation occurs due to neutrons absorption inside of the indicator material in the field of epithermal neutron nuclear reactor. This effect may have a great importance especially if indicator materials had resonances in this energy range. The self-shielding factor (G_{res}) should be considered at activation for taking into account the effect of the neutron flux perturbation. This factor depends on geometry and sample size as well as on physical and nuclear properties of isotope. The authors have proposed the curve, which agrees well with the experimental and the calculated values.

The main aim of the study is to identify the corrections on self-shielding of activation indicators under reactor irradiation.

Research methods: modeling and implementation of neutronic calculations of reaction rate of activation using MCNP5 program depending on indicators thickness and nuclear concentration of isotopes; selection of analytical dependencies for calculation of self-shielding factors.

Results. The paper introduces the results of neutronic calculations of self-shielding factors for activation gold/tantalum indicators, used as an indicator of activation by neutron irradiation. The authors obtained the dependences of correction factors on indicator thickness, the analytical formulas for the indicator and dependences of the reaction rate on the concentration of isotopes. The results of calculations will be used while conducting the Instrumental Neutron Activation Analysis for nuclear engineering structural materials by single-limit comparative method of k_0 -standartization at IVG.1M research reactor.

Key words:

Self-shielding factor, activation indicator, reaction rate, MCNP code, neutronic calculations.

REFERENCES

- Jagodish K Tuli. Nuclear Wallet cards (Sixth edition): National Nuclear Data Center for the U.S: Nuclear Data Program: Brookhaven National Laboratory. New York, Upton. 2000. Available at: <http://www.nndc.bnl.gov/wallet/wccurrent.html> (accessed 10 February 2016).
- X-5 Monte Carlo Team. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 5. Vol. I: Overview and Theory. Los Alamos National Laboratory Report: LA-UR-03-1987. 2003 (Revised 10/3/05). Available at: <http://www.nucleonica.net/wiki/images/8/89/MCNPvolI.pdf> (accessed 10 February 2016).
- MacFarlane R.E. New Thermal Neutron Scattering Files for ENDF/B-VI Release 2: Report LA-12639-MS (ENDF-356) UC-413: Los Alamos National Laboratory. 1994. Available at: <http://t2.lanl.gov/nis/publications/methods.pdf> (accessed 10 February 2016).
- Goncalves I.F., Martinho E., Salgado J. Extension to cylindrical samples of the universal curve of resonance neutron self-shielding factors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2004, no. 213, pp. 186–188.
- Goncalves I.F., Martinho E., Salgado J. Monte Carlo calculation of epithermal neutron resonance self-shielding factors in foils of different materials. *Applied Radiation and Isotopes*, 2002, no. 56, pp. 945–951.
- Salgado J., Martinho E., Goncalves I.F. Epithermal neutron self-shielding factors in foils for collimated beams. *Applied Radiation and Isotopes*, 2004, vol. 60, pp. 677–681.
- Furcia H., Arribère M., Ribeiro Guevara S. Self-shielding corrections in cylindrical samples in gamma spectrometry with germanium well-type detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2013, vol. 705, pp. 132–139.
- Krar M.E., Milad K.F. Direct mathematical calculation of the self-shielding factor for cylindrical radioactive sources. *Journal of Taibah University for Science*, 2015, vol. 2, pp. 62–69.
- Safarzadeh O., Shirani A.S., Minuchehr A. Resonance self-shielding calculation using sub-group method and ABC algorithm. *Progress in Nuclear Energy*, 2015, vol. 78, pp. 303–309.
- Tzika F., Stamatelatos I.E. Thermal neutron self-shielding correction factors for large sample instrumental neutron activation analysis using the MCNP code. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2004, vol. 213, pp. 177–181.
- Tzika F., Stamatelatos I.E., Kalef-Ezra J., Bode P. Large Sample Neutron Activation Analysis: correction for neutron and gamma attenuation. *Nukleonika*, 2004, vol. 49 (1), pp. 115–121.
- Nasrabadia M.N., Jalalib M., Mohammadi A. Calculation of thermal neutron self-shielding correction factors for aqueous bulk sample prompt gamma neutron activation analysis using the MCNP code. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section*, 2007, vol. 263 (2), pp. 473–476.
- Hasemi H., Harada M., Kai T., Sato H., Ooi M., Segawa M., Shinohara T., Kino K., Kamiyama T., Kiyanagi Y. Quantitative evaluation of nuclide density distribution in a substance by neutron resonance absorption transmission method. *Physics Procedia*, 2014, vol. 60, pp. 244–253.

14. Lindstrom R.M., Fleming R.F. Neutron Self-Shielding Factors for Simple Geometries. *Chem. Anal.*, 2008, vol. 53, pp. 855–859.
15. Martinho E., Goncalves I.F., Salgado J. Universal curve of epithermal neutron resonance self-shielding factors in foils, wires and spheres. *Applied Radiation and Isotopes*, 2003, vol. 58, pp. 371–375.
16. Yamamoto H., Yamamoto K. Self-Shielding Factors for Resonance Foils. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1965, vol. 42, pp. 421–424.
17. Sogbadji R.B.M., Nyarko B.J.B., Akaho E.H.K., Abrefah R.G. Determination of Neutron Fluxes and Spectrum Shaping Factors in Irradiation Sites of Ghana's Miniature Neutron Source Reactor (MNSR) by Activation Method after Compensation of Loss of Excess Reactivity. *World Journal of Nuclear Science and Technology*, 2011, vol. 1, pp. 50–56.
18. Tsubone I., Nakajima Y., Kanda Y. Resonance Parameters of Tantalum-181 in Neutron Energy Range from 100 to 4,300 eV. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1987, vol. 24, pp. 975–987.
19. Lomakin S.S., Petrov V.I., Samoylov P.S. *Radiometriya neytronov aktivatsionnym metodom* [Neutron radiometry by the activation method]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 144 p.
20. Salgado J., Martinho E., Goncalves I.F. The calculation of neutron self-shielding factors of a group of isolated resonance. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2004, vol. 260 (2), pp. 317–320.

Received: 11 February 2016.

Information about the authors

Yury V. Aleynikov, Chief of the laboratory, Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan.

Yury A. Popov, deputy chief of the laboratory, Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan.

Irina V. Prozorova, Head of the group, Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan.

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

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректурa *Д.В. Заремба*
Перевод на английский язык *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Подписано к печати 24.03.2016. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 16,75. Уч.-изд. л. 15,15.
Заказ 158-16. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ