

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, № 4, 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)
Кирыянова 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, № 4, 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 questions Geoecology;
- 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

- Охрана искусственных массивов от сейсмического воздействия при подземной добыче руд**
В.И. Голик, Т.Т. Исмаилов, С.Г. Страданченко, В.Г. Лукьянов
- Адаптация метода K0-ИНАА для реактора ИВГ.1М**
Ю.В. Алейников, Ю.А. Попов, Б.С. Медетбеков, С.Б. Кожакханов
- Сравнительный анализ методов регрессии и метода группового учета аргументов при моделировании процессов переработки полезных ископаемых**
С.Ш. Баласанян, Э.М. Геворгян
- Минимальный сток Иртыша в равнинной части бассейна на территории Республики Казахстан в условиях антропогенной нагрузки**
М.А. Бейсембаева, Л.И. Дубровская, В.А. Земцов
- Новые данные по структуре района Ванкорского газонефтяного месторождения**
В.Г. Житков, А.А. Поцелуев, Ю.С. Ананьев, В.А. Кринин
- Петролого-геохимические черты рудовмещающего субстрата в гидротермальных месторождениях золота. Часть 1. Петрология околорудного метасоматизма**
И.В. Кучеренко
- Ёмкостной способ контроля качества пропитки обмоток электрических двигателей общепромышленного применения**
Г.В. Смирнов, Д.Г. Смирнов
- Исследование алгоритмов поиска точки максимальной мощности для повышающего преобразователя напряжения солнечного инвертора**
В.А. Русскин, С.М. Семёнов, Р.К. Диксон
- Сопrotивление пылевого осадка в щелевом фильтре**
Ю.А. Зыкова, Н.М. Самохвалов, В.В. Виноградов
- Исследование процесса испарения фаз в буровых растворах на углеводородной основе**
Д.В. Тирон, Н.М. Уляшева
- Климатические особенности и статистические оценки изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на территории севера Западной Сибири**
М.В. Решетько, Ю.А. Моисеева
- Неоднородность пластических деформаций оливина в ультрамафитах Байкало-Муйского офиолитового пояса (северо-восточное Прибайкалье)**
А.И. Чернышов, Е.Е. Пугачёва
- Структура Водораздельной рудной зоны Многовершинного месторождения золота: данные по открытым горным выработкам и керну скважин**
В.В. Сластников
- Математическое описание неизотермических фильтрационных течений бинарной газовой смеси**
Б.В. Семенов, М.В. Шумкина, Н.В. Лапик, Н.В. Попова
- Иерархическая концепция неоднородности почв и планирование масштаба исследования**
А.В. Захарченко, В.И. Алексеев, Д.В. Ипатова

CONTENTS

- 6 Protection of artificial arrays from seismic impact at ore underground mining**
V.I. Golik, T.T. Ismailov, S.G. Stradanchenko, V.G. Lukyanov
- 16 Adaptation of k0-INAA method to IVG.1M reactor**
Yu.V. Aleynikov, Yu.A. Popov, B.S. Medetbekov, S.B. Kozhakhhanov
- 23 Comparative analysis of the regression methods and data group accounting method in modeling mineral processing**
S.S. Balasanyan, H.M. Gevorgyan
- 35 Minimum flow of the upper Irtysh river in the basin flat part in the Republic of Kazakhstan under anthropogenic impact**
M.A. Beysembaeva, L.I. Dubrovskaya, V.A. Zemtsov
- 44 New data for structural position of Vankor oil-gas deposit and surrounding area**
V.G. Zhitkov, A.A. Potseluev, Yu.S. Ananiev, V.A. Krinin
- 55 Petrologic and geochemic features of the ore-containing substratum in hydrothermal gold deposits. Part 1. Petrology of the near-ore metasomatism**
I.V. Kucherenko
- 69 Capacitive method for controlling the quality of winding impregnation in electric motor for general industrial use**
G.V. Smirnov, D.G. Smirnov
- 78 Study of algorithms for tracking maximum power point for boost DC-DC converter of solar inverter**
V.A. Russkin, S.M. Semenov, R.C. Dixon
- 88 Dust layer resistance in the slotted filter**
Yu.A. Zykova, N.M. Samokhvalov, V.V. Vinogradov
- 97 The research of phase evaporation in oil-based muds**
D.V. Tiron, N.M. Ulyasheva
- 108 Climatic features and statistical evaluation of climate change in permafrost regions in the north of Western Siberia**
M.V. Reshetko, Yu.A. Moiseeva
- 119 Heterogeneity of plastic deformations of olivine in ultramafic rocks of the Baikalo-Muya ophiolite belt (north-east of Baikal)**
A.I. Chernyshov, E.E. Pugacheva
- 130 Structure of Vodorazdelnaya ore zone of Mnogovershinnoye (MNV) gold deposit: data on open surface workings and diamond drilling core**
V.V. Slastnikov
- 142 Mathematical description of non-isothermal filtration flows of binary gas mixture**
B.V. Semenov, M.V. Shumkina, N.V. Lapik, N.V. Popova
- 149 Hierarchical concept of soil heterogeneity and planning the scale of investigations**
A.V. Zakharchenko, V.I. Alexeev, D.V. Ipatova

УДК 504.55.054:622(470.6)

ОХРАНА ИСКУССТВЕННЫХ МАССИВОВ ОТ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧЕ РУД

Голик Владимир Иванович^{1,2},
v.i.golik@mail.ru

Исмаилов Тахир Турсунович³,
tismailov@mail.ru

Страданченко Сергей Георгиевич⁴,
ssg72@mail.ru

Лукьянов Виктор Григорьевич⁵,
lukyanov@tpu.ru

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

² Владикавказский научный центр РАН, СО-Алания,
Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а.

³ Министерство финансов,
Россия, 125993, г. Москва, ГСП-3, Ленинградский проспект, 49.

⁴ Донской государственный технический университет,
Россия, 346500, г. Шахты, ул. Шевченко, 147.

⁵ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы обусловлена необходимостью изыскания технологий охраны искусственных закладочных массивов в процессе взрывной отбойки при подземной разработке металлических месторождений.

Цель работы: обоснование технической возможности минимизации разрушающего воздействия сейсмических колебаний, генерируемых взрывными волнами, как условия обеспечения безопасности работ и повышения качества добываемых руд.

Методы исследования: обзор передового опыта ведущих предприятий, использование результатов натуральных и лабораторных исследований по материалам публикаций, математическое моделирование технолого-экономических исследований, статистическая обработка имеющихся данных на основе множественного регрессионного и корреляционного анализа.

Результаты. Систематизированы сведения об использовании способов управления параметрами взрывной отбойки и дробления руд при системах разработки с закладкой твердеющими смесями. Определено, что объекты горного производства неоднородны и скорости смещения их структурных элементов неоднозначны. Показано, что эффективность технологий с твердеющими смесями снижается вследствие засорения руды материалом закладки и появлением технологических отслоений пород. Подтверждена ведущая роль сейсмозрывных колебаний пород. Рекомендован метод профилактики опасных сейсмических колебаний путем разделения процессов взрывного разрушения во времени с помощью экранирования взрывных волн и регулирования параметров отбойки.

Выводы. Горный массив и слагающие его породы неоднородны, и скорости смещения их при одинаковых условиях взрывания неоднозначны. Особенностью технологий с закладкой твердеющими смесями является опасность разрушения искусственного массива взрывными работами. В механизме разрушения ведущую роль играют сейсмозрывные колебания пород, если скорость их смещения превышает пределы. Профилактика опасных сейсмических колебаний осуществляется разделением процессов разрушения во времени. Наиболее опасной является зона от 10 до 70 м от центра взрыва. Искусственный массив сохраняет устойчивость до тех пор, пока напряжения на фронте волны не превышают предела прочности закладочного материала. Управление сейсмическим действием взрыва с целью сохранения безопасных условий для массива и уменьшения разубоживания руды закладочным материалом осуществляется с помощью экранирования взрывных волн и регулирования параметров отбойки.

Ключевые слова:

Технология, искусственный массив, отбойка, разработка, месторождение, сейсмическое колебание, взрывная волна, безопасность, качество, руда.

Введение

Подземная разработка месторождений полезных ископаемых должна обеспечивать сохранность объектов эксплуатации, безопасное ведение горных работ и охрану недр и окружающей среды. Наиболь-

шие риски связаны со взрывными работами. Для уменьшения риска необходим учет воздействия сейсмозрывных колебаний на массив и объекты.

Горно-геологическим и гидрогеологическим условиям скальных месторождений в наибольшей

мере отвечают камерные системы разработки с заполнением выработанного пространства твердеющей смесью [1, 2], которые применяются при отработке крутопадающих рудных залежей с углом падения более 50° и мощностью от 3 до 100 м в устойчивых породах с коэффициентом крепости по Протодьяконову не менее 12.

Параметры блока: высота – 60–70 м (обычные блоки) или 100–120 м (высокие блоки), длина – 20–100 м, ширина равна мощности рудного тела при расположении камер по простиранию залежей и 15–20 м при расположении камер вкрест простирания залежей.

Запасы отработывают преимущественно в две стадии. Линия забоя ступенчатая или близкая к вертикальной. Отбойка руды осуществляется зарядами взрывчатых веществ (ВВ) в скважинах, пробуренных из поэтажных выработок. Выпуск отбитой руды из блока – или самотечный через выработки в нижней части блока или через торец выработки.

Выработанное пространство камер заполняется твердеющей смесью прочностью от 1,0 МПа. Заполнение техногенных пустот твердеющими смесями сделало системы разработки универсальными и высокоэффективными [3].

Между камерами первой очереди остаются целики шириной, равной ширине камер, днище вышележащего блока обрушается при отработке нижележащего днища. Отработка запасов камер ведется в направлении от центра блока к флангам для камер первой очереди и от одного фланга к другому – для камер второй очереди при разработке камер по простиранию. Камеры, заложенные вкрест простирания, отработывают от лежащего бока к висячему или наоборот.

В связи с ростом цен на вяжущие вещества и подорожанием тарифов на транспортирование экономическая целесообразность применения систем разработки с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями в каждом конкретном случае требует обоснования. Положение усугубляется тем, что даже небольшое разубоживание руды закладочным материалом влияет на показатели ее обогащения, выход отходов и экологии региона. Загрязнение руды цементом на 1 % снижает извлечение металлов в концентраты при обогащении на 1 %, в то время как разубоживание вмещающими породами – лишь на 0,15 % [4].

Результаты и их обсуждение

Оптимизация нормативной прочности закладочных смесей состоит в сокращении сроков перевода искусственного массива в состояние объемного сжатия, заполнении камер смесью по всему периметру, обеспечении сплошного фронта очистных работ и использовании других вариантов регулирования напряжений [5–7].

При варианте с наклоном стенки искусственного массива на рудный массив и использовании экранирующей щели (рис. 1) обрушается лишь

верхняя часть закладки, снижая разубоживание руды закладкой на 3–5 %.

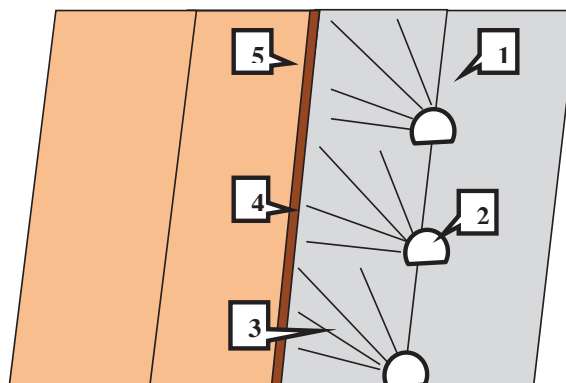


Рис. 1. Вариант системы разработки с наклоном стенок камер на рудный массив: 1 – рудный массив; 2 – выработка; 3 – скважины для размещения ВВ; 4 – экранирующая щель; 5 – искусственный массив

Fig. 1. Alternative development system with tilt cameras on the walls of the ore mass: 1 is the ore array; 2 is the production; 3 are the wells for spacing explosives; 4 is the shielding slit; 5 is the artificial array

При варианте с предохранительными массивами из твердеющих смесей путем опережающей выемки камеры на границе рудной залежи создается защитная стенка, после чего извлекают основные запасы камер (рис. 2).

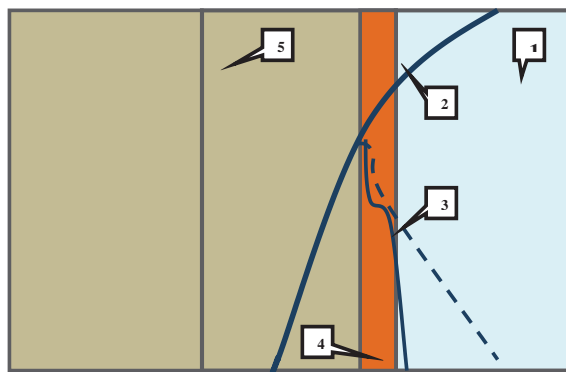


Рис. 2. Вариант системы разработки с предохранительным массивом: 1 – рудный массив; 2 – геологический разлом; 3 – геологическое нарушение; 4 – защитная стенка; 5 – искусственный массив

Fig. 2. System design variant with an array of safety: 1 is the ore mass; 2 is the geological fault; 3 is the geological violation; 4 is the protective wall; 5 is the artificial array

При технологии с предварительным упрочнением пород (рис. 3) для укрепления пород используют стальные канаты диаметром 18–25 мм, бетонируемые в скважинах длиной 10–17 м.

Укрепление пород способствует использованию энергии закладочного массива на упрочнение, однако эти меры эффективны не всегда, так как рассчитаны на статические условия работы массивов.

Основным критерием динамического воздействия при производстве взрывных работ является

скорость смещения V на фронте сейсмозрывных колебаний. Сохранность подземных объектов обеспечивается, если скорость смещения при взрывах V_b не превышает допустимых пределов V_∂ [8]:

$$V_b < V_\partial.$$

Развитие природных трещин и вывалы пород наблюдаются при $V_b=20-50$ см/с, поэтому этот интервал принимается как предельно допустимый по динамическому проявлению горного давления.

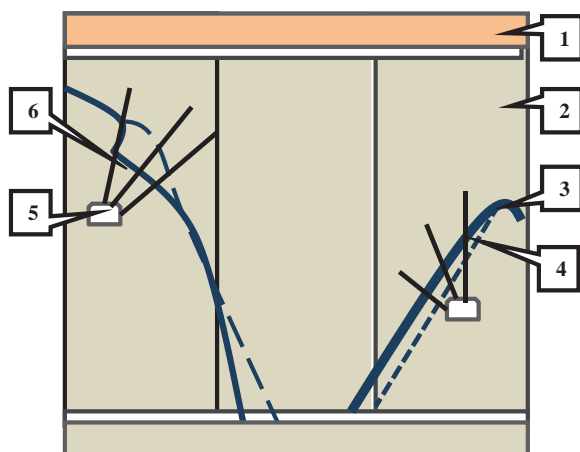


Рис. 3. Вариант системы разработки с анкерной крепью: 1 – искусственный массив; 2 – рудный массив; 3 – разлом; 4 – геологическое нарушение; 5 – выработка; 6 – анкеры

Fig. 3. Alternative development system with roof bolting: 1 is the artificial array; 2 is the ore array; 3 is the fault; 4 is the geological violation; 5 is the production; 6 are the anchors

При оценке сейсмического действия взрыва деформации горных пород не должны превышать величины относительной деформации: $\varepsilon=0,0002-0,0003$.

Скорость смещения пород

$$V = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^n, \text{ см / с,}$$

где K – коэффициент, характеризующий свойства среды, проводящей сейсмические колебания;

$\rho = \frac{\sqrt[3]{Q}}{r}$ – приведенная масса заряда, кг/м; Q – масса заряда, кг; r – расстояние от места взрыва до пункта наблюдения, м; n – коэффициент, характеризующий условия ведения взрывных работ.

Допустимая масса заряда при известном расстоянии до охраняемых объектов

$$Q = \left[\frac{V_{\text{доп}}}{K} \right]^{\frac{3}{n}} r^3, \text{ кг.}$$

Безопасное расстояние по сейсмическому действию взрыва при известной массе заряда

$$r = \left[\frac{K}{V_{\text{доп}}} \right]^{\frac{3}{n}} \sqrt[3]{Q}, \text{ кг.}$$

Массив представляет собой скальную дискретную среду, жесткость которой изменяется в процессе деформирования в зависимости от напряжений. Производство в массиве горных работ сопровождается его реакцией в виде образования зон ослабленности и разгрузки от опорного давления. Развитие напряжений и соответствующих им деформаций сопровождается отслоениями пород, влияющими на показатели технологии разработки [9, 10].

Чувствительность участков земной коры, находящихся в стабильно неустойчивом состоянии, проявляется в виде сейсмического отклика на техногенное воздействие, вызвавшее изменение естественного напряженного состояния [11]. Наведенная сейсмичность активизируется горными работами: добычей полезных ископаемых с открытым выработанным пространством и обрушением пород, закачкой воды, захоронением жидких отходов и др. [12–15].

Способом регулирования напряжений является корректировка несущей способности пород во времени и пространстве технологическими методами, которые позволяют изменять динамические явления на статические за счет использования эффекта превентивного ослабления пород.

Состояние массивов оценивается уровнем действующих в них напряжений [16]:

$$\sigma_1 \pm k\sigma_{2,3} \leq \sigma_{\text{сж}} =$$

$$= \begin{cases} \sigma_{\text{сж}}^0 = \int_0^{Z_0^{\text{max}}} f(x, dx_1, dx_2 \dots dx_n) \rightarrow \\ \sigma_{\text{закл}} = k_{\text{упр}} \int_0^{Z_0^{\text{max}}} f(x, dH_s) \\ \sigma_{\text{закл}} = k_{\text{упр}} \int_0^{Z_0^{\text{max}}} f(x, dH_s + dH_c) \\ \sigma_{\text{сж}}^{\text{ост}} \text{ при } H_c = H \rightarrow \sigma_{\text{закл}} = k_{\text{упр}} \int_0^B f(x, dH) \end{cases},$$

где σ_3 – вертикальная составляющая главных напряжений, МПа; $\sigma_{1,2}$ – горизонтальная составляющая главных напряжений, МПа; k – коэффициент влияния структурно-тектонических условий; $\sigma_{\text{сж}}$ – напряжения в верхнем слое нарушенного массива, МПа; $\sigma_{\text{сж}}^0$ – напряжения в зоне влияния выработки, МПа; Z_0 – размеры обнажения, м; $x_1 \dots x_n$ – характеристики пород; $\sigma_{\text{сж}}^{\text{ост}}$ – остаточная прочность нарушенных пород, МПа; $\sigma_{\text{закл}}$ – прочность закладочного массива, МПа; $k_{\text{упр}}$ – коэффициент упрочнения закладочного массива; H_c – высота зоны влияния выработок, м; B – ширина зоны обрушения, м; H – высота зоны обрушения, м; H_s – высота закладочного массива, м.

Радикальным способом управления напряжениями является строительство в выработанном пространстве искусственных массивов из твердеющих смесей. Закладочные массивы создают подпор

породам, обеспечивая условия объемного сжатия для закладочного материала:

$$[\sigma] = K[\sigma]_{\min},$$

где $[\sigma]_{\min}$ – прочность закладки камер, МПа; $[\sigma]$ – прочность закладки без учета бокового подпора, МПа; K – коэффициент бокового подпора.

В процессе обжигания твердеющей закладки тонкие фракции запрессовываются в поры и упрочняют закладку в 1,5–3 и более раз.

Основным фактором воздействия на рудовмещающие массивы является взрывание зарядов взрывчатых веществ (ВВ) для отделения руды от массива и ее дробления. Степень воздействия взрыва на массив определяется количеством ВВ, взрывающегося при одной ступени замедления, а критерием сейсмического действия взрывов является скорость смещения поверхности породного массива, которая на расстоянии 10 м от взрыва достигает 300 см/с. Одна из главных причин деформаций массива с опасными последствиями – возникновение колебаний в элементарных структурных породных блоках.

Горнотехнические объекты постоянно находятся в полях напряжений, вызванных взрыванием ВВ. Каждый горный объект настроен на собственное землетрясение и реагирует на него. Между резонансной частотой сейсмических колебаний и параметрами структурных блоков в массиве существует корреляция [17].

Скорость сейсмоколебаний частиц пород зависит от веса заряда:

$$V = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^n,$$

где K – коэффициент, зависящий от геолого-технологических условий и энергетических характеристик ВВ; n – показатель, зависящий от вида сейсмических волн и условий взрывания.

В породах с высокой акустической жесткостью сейсмические колебания проникают в глубину горного массива, существуют долго, но по интенсивности невелики, поэтому деформирование происходит упруго. При расстояниях от центра взрыва до 15 м скорость сейсмических колебаний зависит от расстояния мало и весьма возрастает, а деформации отличаются упругопластическим и пластическим характером.

В скальных породах при массовом взрывании (5000 кг) для ослабления сейсмических колебаний применяют несколько ступеней замедлений с интервалом 35 мс каждое или 8 замедлений с интервалом 25 мс, что оказывается достаточным для разделения процессов разрушения во времени.

Если напряжения и деформации от отдельных взрывов не образуют трещин, то короткозамедленное взрывание обеспечивает устойчивость горных объектов. В противном случае взрывание с последующими замедлениями ведет к образованию трещин и отслоению пород вне зависимости от замедления.

Короткозамедленное взрывание оказывается успешным в тех случаях, когда заряд ВВ разделен на группы, каждая из которых генерирует недостаточные для разрушения волны напряжений и деформаций в краевой зоне поверхности горной выработки.

При массовой отбойке руды в массиве формируется волна разрушающих напряжений. Она не разрушает сплошности породного массива, пока не достигает поверхности раздела сред с разной акустической жесткостью. Свободная поверхность порождает отраженную волну и создает самые неблагоприятные условия для устойчивости подземных выработок, способствуя явлениям трещинообразования, заколов и вывалов.

Сейсмическое действие взрыва оценивают по скорости, при которой сохранность сооружений гарантирована, а деформации не превышают прогнозируемые. При возбуждении в массиве пород скорости колебаний выше допустимой сохранность зданий или сооружений носит вероятностный характер. Критической скоростью колебаний является такая скорость, выше которой сохранность сооружений оценивается с вероятностью менее 0,5 [18].

В зоне действия взрыва с радиусом 5 м происходит дробление и трещинообразование, на большем расстоянии интенсивность трещинообразования уменьшается, а энергия перерождается в энергию сейсмической волны. С удалением на 10 м энергия взрыва полностью переходит в энергию сейсмических колебаний, поэтому наиболее опасной по сейсмическим воздействиям является зона от 10 до 70 м от места взрыва.

Сейсмическое действие взрыва на искусственный массив определяется энергетическим соотношением волн сжатия-растяжения. Количество энергии, отраженной от границы раздела и прошедшей в искусственный массив,

$$W_{\text{отр}} = W_0 \frac{\rho_{n_1} C_{p_1} - \rho_{n_2} C_{p_2}}{\rho_{n_1} C_{p_1} + \rho_{n_2} C_{p_2}}, \text{ Дж};$$

$$W_{\text{пр}} = W_0 \frac{4\rho_{n_1} C_{p_1} \cdot \rho_{n_2} C_{p_2}}{\rho_{n_1} C_{p_1} + \rho_{n_2} C_{p_2}}, \text{ Дж},$$

где W_0 – суммарная энергия волны, падающей на границу раздела; $\rho_{n_1} C_{p_1}$ – акустическая жесткость руд ($14,6 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3 \cdot \text{м/с}$); $\rho_{n_2} C_{p_2}$ – акустическая жесткость закладочного массива ($3,0 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3 \cdot \text{м/с}$).

Если в массив из твердеющих смесей переходит только 75 % энергии сейсмической волны, скорость сейсмоколебаний частиц материала

$$V_3 = 90 \rho^{2,25} \cdot 10^{-2}, \text{ м/с},$$

где $\rho = \frac{\sqrt[3]{Q}}{r}$ – приведенный вес заряда ВВ.

Прочность твердеющих смесей не превышает 6,0 МПа, поэтому искусственный целик сохранит устойчивость только в том случае, если напряже-

ния на фронте волны не будут превышать предела прочности закладочного материала, что обеспечивается при весе ВВ в одном замедлении до 300 кг.

Максимальные напряжения на фронте сейсмической волны в искусственных целиках могут быть определены графически (рис. 4).



Рис. 4. Номограмма для определения напряжений на фронте волны

Fig. 4. Nomogram for determining stress on the wave front

Напряжения на фронте сейсмической волны в закладочном материале связаны с напряжениями на фронте сейсмической волны:

$$\sigma_{з.м} = \sigma_{р.т} \frac{2\rho_{n_2} C_{\rho_2}}{\rho_{n_1} C_{\rho_1} + \rho_{n_2} C_{\rho_2}}, \text{ МПа.}$$

Скорость сейсмических колебаний частиц пород зависит от количества одновременно взрываемого количества ВВ на различном расстоянии от центра взрыва:

$$r = 7,5 \text{ м } V(0,22Q + 20) \cdot 10^{-2}, \text{ м/с;}$$

$$r = 8,5 \text{ м } V(0,2Q + 10) \cdot 10^{-2}, \text{ м/с;}$$

$$r = 10,0 \text{ м } V(0,13Q + 8) \cdot 10^{-2}, \text{ м/с;}$$

$$r = 12,0 \text{ м } V(0,09Q + 5) \cdot 10^{-2}, \text{ м/с;}$$

$$r = 15,0 \text{ м } V(0,05Q + 3) \cdot 10^{-2}, \text{ м/с.}$$

Скорость сейсмических колебаний частиц пород в рудном массиве связана с напряжением на фронте сейсмической волны:

$$\sigma_{р.т} = 15V, \text{ МПа.}$$

При одновременном взрывании до 400 кг ВВ напряжения на фронте преломленной в искусственный целик сейсмической волны достигают 6,0 МПа. Нормальные растягивающие напряжения на контуре искусственного целика изменяются в пределах от 1,7 до 8,4 МПа, а касательные напряжения – от 1,5 до 3,6 МПа.

При взрывании вблизи искусственных целиков на их контуре возникают сжимающие и растягивающие напряжения, превышающие величину напряжения на фронте ударной волны и достаточные

для его разрушения. Наряду с разрушениями в приконтурной части целиков трещины образуются в объеме всего целика. В окрестностях искусственных целиков возникают деформации, сопровождающиеся разубоживанием руды закладочным материалом.

Для обеспечения устойчивости искусственных целиков от воздействия массовых взрывов параметры напряжений в закладке регулируют способом, основанным на принципе отражения волн от границы раздела сред с различными акустическими свойствами, с помощью экранирования.

Между основной массой заряда и контуром искусственного целика возникает разрыхленная зона, которая играет роль экрана. Для этого достаточно заряд, превышающий заряд рыхления на 15–20 %.

Снижение сейсмического воздействия взрывов достигается короткозамедленным взрыванием, которое обеспечивает максимальное использование энергии взрыва на дробление горных пород и снижение расхода энергии на работу сейсмических волн. Интервал замедления, при котором исключается наложение напряжений от взрыва зарядов соседних серий, должен быть равным или большим 25 мс. При мгновенном взрывании интенсивность сейсмического воздействия в 2 раза выше, чем при короткозамедленном.

Скорость колебаний при короткозамедленном взрывании

$$V = K \frac{1}{r} \sqrt{\frac{q}{L} + r} \mu \frac{1}{\Delta t} \cdot 10^{-2}, \text{ м/с,}$$

где V – скорость колебаний частиц пород, м/с; K – коэффициент пропорциональности; r – расстояние от места взрыва до точки наблюдения, м; q – вес заряда в одной ступени, кг; L – длина взрываемого блока, м; Δt – время замедления одной ступени, с.

Применение короткозамедленного взрывания для снижения сейсмического эффекта взрыва эффективно, когда заряд ВВ разделен на группы, каждая из которых обеспечивает параметры волн, недостаточные для разрушения краевой зоны у свободной поверхности горной выработки.

Наиболее опасной является ситуация, когда акустическая жесткость среды близка к нулю. Это имеет место в случае, когда волна напряжений встречает на своем пути свободную поверхность – горную выработку. Наличие свободной поверхности вызывает отраженную волну и создает опасность для устойчивости выработок, генерируя трещины, заколы и вывалы.

Защита закладочного массива от сейсмического воздействия взрыва производится экранированием. Для этого основную часть скважин, примыкающих к искусственному целику, взрывают с замедлением по сравнению с концами этих скважин (рис. 5).

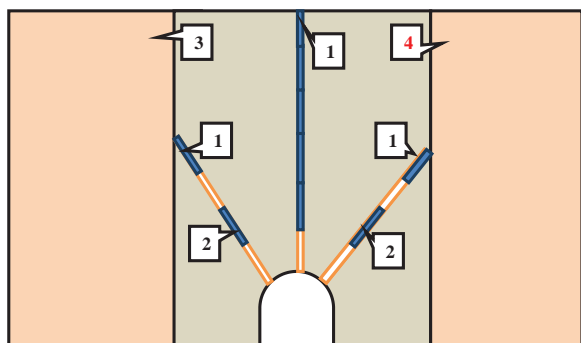


Рис. 5. Схема отбойки вееров с экранированием взрывных волн: 1 – мгновенное взрывание; 2 – замедление 1; 3 – замедление 2; 4 – охраняемый массив

Fig. 5. Diagram of fan breaking with shielding blast waves: 1 is the instantaneous blasting; 2 is the deceleration 1; 3 is the deceleration 2; 4 is the guarded array

В первую очередь без замедления взрывают заряды в донных частях скважин, примыкающих к закладке. После этого взрывают вторую часть заряда скважин с замедлением и центральные скважины с еще большим замедлением. Подбором интервалов замедления и расхода заряда добиваются возникновения разрыхленной зоны – экрана.

Экранирование характеризуется достаточной и необходимой для образования экранирующей преграды энергией взрыва, временем между взрыванием зарядов для экрана и разрушения и пространственным расположением преграды по отношению к разрушающим рудный массив зарядам.

Эффективность экранирования зависит от совместного действия продольных и поперечных волн и повышается там, где волны действуют совместно. При мгновенном взрывании образующих экран зарядов время его образования составляет 70–75 мс. Экранирование позволяет уменьшить разубоживание руды закладочным материалом на 5–10 %.

Управление сейсмическим действием взрыва с целью сохранения безопасных условий для массива и уменьшения разубоживания руды закладочным материалов включает ряд условий:

1. Сохранение устойчивости искусственного целика:

$$V_{np} \leq 2V_0.$$

2. Непревышение допустимой скорости сейсмических колебаний V_0 :

$$V_0 = \frac{K_{co} \left(C_p^2 - \frac{4}{3} C_s^2 \right) \{ [1 + (1 - 2\mu)\varepsilon_0]^{\frac{8}{3}} - 1 \}}{C_p [1 + (1 - 2\mu)\varepsilon_0]^4}, \text{ м/с.}$$

2. Вероятность сохранности искусственных целиков

$$P = e^{-0.01e^{\left(\frac{V}{V_0}\right)^2}} \approx \exp\left(-\frac{V}{U_0}\right).$$

3. Скорость колебания на фронте сейсмической волны

$$V = 156\rho^{229} \cdot 10^{-2}, \text{ м/с.}$$

4. Потеря энергии волны в экране

$$W_{np} = W_{\Sigma} \frac{4(1 - 0,5q_a)^4}{[1 + (0,5q_a)^4]^2}, \text{ Жд.}$$

5. Максимально допустимый вес, взрываемый в одном замедлении,

$$Q_1 \leq \left(\frac{V_{np} R^n}{K} \right)^{\frac{3}{n}} = \left(\frac{V_{np}}{K} \right)^{\frac{3}{n}} R^3.$$

Условие прочности, при котором целик не подвержен нарушению:

$$\sigma \leq \sigma_c,$$

где σ – напряжение на фронте волны, МПа; σ_c – предел прочности твердеющих смесей при одноосном сжатии.

Напряжение на фронте волны в закладочном массиве намного меньше напряжения на фронте волны по рудному массиву и зависит от веса заряда:

$$\sigma_a = 0,34\sigma_{max}\rho^{2,25} \cdot 10^{-2} \text{ МПа.}$$

Нормальные и касательные напряжения на контакте искусственного целика могут быть определены по схеме (рис. 6).

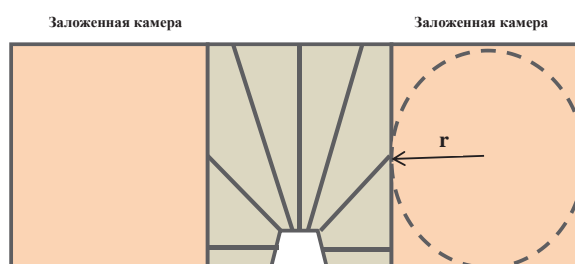


Рис. 6. Расчетная схема определения нормальных и касательных напряжений: r – радиус искусственного целика

Fig. 6. Diagram of definition of normal and shear stresses: r is the radius of artificial pillar

$$\sigma_v = \frac{\sigma}{2} \left(1 - \frac{r^2}{r_i^2} \right) + \frac{\sigma}{2} \left(1 - \frac{4r^2}{r_i^2} + \frac{3r^4}{r_i^4} \right) \cos 2\alpha \text{ МПа;}$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma}{2} \left(1 - \frac{r^2}{r_i^2} \right) + \frac{\sigma}{2} \left(1 + \frac{3r^4}{r_i^4} \right) \cos 2\alpha \text{ МПа,}$$

где σ – напряжение на фронте волны, МПа; r – радиус искусственного целика, м; r_i – текущий радиус распространения волны, м; α – угол распространения фронта волны горизонтальной оси, град.

Если границей раздела двух сред будет не «массив–воздух», а «массив – разрыхленная порода», энергия отраженной волны будет существенно меньше энергии падающей волны, поэтому для получения нужных параметров дробления энергия взрыва должна быть увеличена на коэффициент зажима:

$$K_{\text{зак}} = \left(\frac{A_1 + A_2}{A_1 - A_2} \right)^2,$$

тогда

$$W_{\text{уд}} = W_0 K_{\text{зак}}.$$

Полученные результаты могут найти применение при построении информационно-мониторинговых систем геодинамической безопасности на горнодобывающих предприятиях [19–20].

Заключение

Кристаллический горный массив, кора выветривания и рыхлые отложения между извлекаемыми запасами руд по геологическим, гидрогеологическим и геомеханическим условиям весьма неоднородны, и скорости смещения их структурных элементов при одинаковых условиях взрыва неоднозначны.

Технологии разработки рудных месторождений с закладкой выработанного пространства твердыми смесями характеризуются опасностью разрушения искусственного массива взрывными

работами с засорением руды материалом закладки и появлением технологических отслоений пород в рудовмещающем массиве. При этом ведущую роль играют сейсмозрывные колебания пород, если скорость смещения при взрывах превышает допустимые для данных условий пределы.

Искусственный массив сохраняет устойчивость до тех пор, пока напряжения на фронте волны не начинают превышать предела прочности закладочного материала, что обеспечивается путем уменьшения количества ВВ в одном замедлении. Наиболее опасной по сейсмическим воздействиям является зона от 10 до 70 м от центра взрыва.

Профилактика опасных сейсмических воздействий осуществляется использованием ступеней замедлений взрывов ВВ в скважинах для разделения процессов разрушения во времени. Управление сейсмическим действием взрыва с целью сохранения безопасных условий для массива и уменьшения разубоживания руды закладочным материалом осуществляется с помощью экранирования взрывных волн и регулирования параметров отбойки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ляшенко В.И. Природоохранные технологии освоения сложноструктурных месторождений полезных ископаемых // Маркшейдерский вестник. – 2015. – № 1. – С. 10–15.
2. Дик Ю.А., Котенков А.В., Танков М.С. Геомеханическое обоснование камерной системы разработки с «шахматным» расположением ромбовидных камер и закладкой выработанного пространства // Горный журнал. – 2014. – № 9. – С. 89–94.
3. Study on Influencing Factors of Ground Settlement over Mined-out Area / Sun Chao, Bo Jing-shan, Liu Hong-shuai, et al. // Journal of Jilin University (Earth Science Edition). – 2009. – № 3. – P. 498–502.
4. Шестаков В.А. Проектирование горных предприятий. – М.: МГТУ, 1995. – 490 с.
5. Fisor S. Roof bolting technology // Coal Age. – 2012. – V. 117. – № 5. – P. 28–30.
6. Onica I. Introduction in the Numerical Methods Used in the Mining Excavations Stability Analysis (in Romanian). – Petroșani: Universitat Publishing House, 2001. – 156 p.
7. Укрепление вмещающих пород при отработке урановых месторождений Стрельцовского рудного поля камерными системами разработки / Т.И. Юшина, И.М. Петров, Г.И. Авдеев, В.С. Валавин // Горный журнал. – 2015. – № 2. – С. 90–94.
8. Improving the effectiveness of explosive breaking on the bade of new methods of borehole charges initiation in quarries / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun, I. Gaponenko // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 7. – P. 383–386.
9. Golik V.I., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Experimental Study of Non-Waste Recycling Tailings Ferruginous Quartzite // Research India Publications. – 2015. – № 15. – P. 35410–35416.
10. Pfitze M., Drebenstedt C. Actual state of technique for selective mining and materials identification // Continuous Surface Mining – Latest Developments in Mine Planning, Equipment, and Environmental Protection. – Freiberg: TU Bergakademie, 2010. – P. 158–164.
11. 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. – V. 20. – № 11. – P. 7777–7786.
12. Deformation and failure characteristics of high and steep slope and the impact of underground mining / D.S. Wang, J.P. Chang, Z.M. Yin, Y.G. Lu // Transit Development in Rock Mechanics-Recognition, Thinking and Innovation: Proc. of the 3rd ISRM Young Scholars Symposium on Rock Mechanics. – USA, 2014. – P. 451–457.
13. Enhancement of lost ore production efficiency by usage of canopies // V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun, V. Zaalishvili // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 4. – P. 325–329.
14. Finding zones of stress concentrations and seismic events in deep ore mining affected by high horizontal stresses / V. Eremenko, A. Eremenko, L. Gakhova, I. Klislin // Sixth International Seminar on Deep and High Stress Mining. – Perth, Australia, 8–30 March 2012. – P. 443–450.
15. Wang Li, Zhang Xiu-feng. Correlation of ground surface subsidence characteristics and mining disasters under super-thick overlying strata // Journal of China Coal Society. – 2009. – V. 34. – № 8. – P. 1048–1051.
16. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Geomechanical terms of use of the mill tailings for preparation // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 4. – P. 321–324.
17. Протосеня А.Г., Куранов А.Д. Методика прогнозирования напряженно-деформированного состояния горного массива при комбинированной разработке Коашвинского месторождения // Горный журнал. – 2015. – № 1. – С. 90–93.
18. Жукова С.А., Самсонов А.В. Оценка влияния природных факторов на проявление сейсмичности Хибинского массива // Горный журнал. – 2014. – № 10. – С. 123–126.
19. Методологические основы построения информационно-мониторинговых систем геодинамической безопасности на горнодобывающих предприятиях / А.В. Нероба, В.П. Марысюк, В.Н. Опарин, А.П. Тапсиев // Горный журнал. – 2015. – № 6. – С. 89–92.
20. Hencher S. Practical Engineering Geology. – Abingdon; New York: Spon Press, 2012. – 450 p.

Поступила 16.02.2016 г.

Информация об авторах

Голик В.И., доктор технических наук, профессор кафедры «Горное дело» Северо-Кавказского государственного технологического университета; главный научный сотрудник Геофизического института Владикавказского научного центра РАН.

Исмаилов Т.Т., доктор технических наук, профессор кафедры экономики Всероссийской государственной налоговой академии Министерства финансов.

Страданченко С.Г., доктор технических наук, профессор, ректор Института сферы обслуживания и предпринимательства Донского государственного технического университета.

Лукьянов В.Г., доктор технических наук, профессор кафедры транспорта и хранения нефти Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 504.55.054:622(470.6)

PROTECTION OF ARTIFICIAL ARRAYS FROM SEISMIC IMPACT AT ORE UNDERGROUND MINING

Vladimir I. Golik^{1,2},
v.i.golik@mail.ru

Takhir T. Ismailov³,
tismailov@mail.ru

Sergey G. Stradanchenko⁴,
ssg72@mail.ru

Victor G. Lukyanov⁵,
lukyanov@tpu.ru

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

² Geophysical Institute of Vladikavkaz scientific center of the RAS,
93a, Markov street, Vladikavkaz, 362002, the Republic of North Ossetia–Alania, Russia.

³ Tax Academy of the Russian Federation,
49, Leningradsky Avenue, GSP-3, Moscow, 125993, Russia.

⁴ Don State Technical University,
147, Shevchenko street, Shakhty, 346500, Russia.

⁵ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to find the techniques for protecting artificial filling arrays in blasting at underground mining of metal deposits.

The aim of the research is to study the technical possibility to minimize the damaging effect of seismic waves generated by the blast, as a condition for ensuring the safety of operations and improving the quality of extracted ore.

Methods: a review of best practices of leading companies, using the results of field and laboratory researches on publication materials, mathematical modeling of technological and economic researches, statistical processing of the data available on the basis of multiple regression and correlation analysis.

Results. The authors have systematized the information on application of the methods of controlling the parameters of blasting and crushing ore at the development systems when filling with hardening mixtures. It was determined that mining production facilities are heterogeneous and displacement rates of their structural elements are ambiguous. It was shown that the indices of techniques with hardening mixtures decrease due to ore clogging with the filling material and due to occurrence of technological rock cleavage. The authors proved the leading role of rock seismic vibrations and recommended the method of preventing dangerous seismic vibrations by separation of explosive destruction in time, screening blast waves and controlling breaking options.

Conclusions. Mountain massif and the rocks building it up are inhomogeneous; the rates of their displacement at the same blasting conditions are ambiguous. The danger of artificial array destruction with explosive works is the feature of techniques when filling with hardening mixtures. Seismic-explosive waves of the rocks play the leading role in destruction, if the rate of their displacement exceeds the limits. Dangerous seismic vibrations are prevented by separation of destruction processes in time, the most dangerous is the range from 10 to 70 m from the burst point. The artificial array remains stable as long as the voltage at the wave front does not exceed the ultimate strength of the packing material. To maintain safe environment for the array and reduce ore dilution by packing materials the explosion seismic action is controlled by screening blast waves and adjusting breaking options.

Key words:

Technology, artificial array, breaking, design, field, seismic waves, blast wave, safety, quality, ore.

REFERENCES

1. Lyashenko V.I. Prirodookhrannyye tekhnologii osvoeniya slozhno-strukturnykh mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh [Environmental technologies of developing complex-structured mineral deposits]. *Mine surveying bulletin*, 2015, no. 1, pp. 10–15.
2. Dik Yu.A., Kotenkov A.V., Tankov M.S. Geomechanical substantiation of chamber development system with the «checkerboard» arrangement of diamond-shaped cells and stowing. *Mining journal*, 2014, no. 9, pp. 89–94. In Rus.
3. Sun Chao, Bo Jing-shan, Liu Hong-shuai. Study on Influencing Factors of Ground Settlement over Mined-Out Area. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2009, no. 3, pp. 498–502.
4. Shestakov V.A. *Proektirovaniye gornyykh predpriyaty* [Design of mining enterprises]. Moscow, MGGU Publ., 1995. 490 p.
5. Fiscor S. Roof bolting technology. *Coal Age*, 2012, vol. 117, no. 5, pp. 28–30.
6. Onica I. *Introduction in the Numerical Methods Used in the Mining Excavations Stability Analysis* (in Romanian). Petroșani, Universitas Publishing House, 2001. 156 p.

7. Yushina T.I., Petrov I.M., Avdeev G.I., Valavin V.S. Strengthening of surrounding rocks in field mining of uranium deposits in Strel'tsovskoe ore field by the development chamber systems. *Mining journal*, 2015, no. 2, pp. 90–94. In Rus.
8. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Gaponenko I. Improving the effectiveness of explosive breaking on the base of new methods of borehole charges initiation in quarries. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, no. 7, pp. 383–386.
9. Golik V.I., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Experimental Study of Non-Waste Recycling Tailings Ferruginous Quartzite. *Research India Publications*, 2015, no. 15, pp. 35410–35416.
10. Pfütze M., Drebenstedt C. Actual state of technique for selective mining and materials identification. In: *Continuous Surface Mining – Latest Developments in Mine Planning, Equipment, and Environmental Protection*. Freiberg, TU Bergakademie, 2010. pp. 158–164.
11. 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, vol. 20, no. 11, pp. 7777–7786.
12. Wang D.S., Chang J.P., Yin Z.M., Lu Y.G. Deformation and failure characteristics of high and steep slope and the impact of underground mining. *Transit Development in Rock Mechanics-Recognition, Thinking and Innovation. Proc. of the 3rd ISRM Young Scholars Symposium on Rock Mechanics*. USA, 2014. pp. 451–457.
13. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Zaalishvili V. Enhancement of lost ore production efficiency by usage of canopies. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, no. 4. pp. 325–329.
14. Eremenko V., Eremenko A., Gakhova L., Klishin I. Finding zones of stress concentrations and seismic events in deep ore mining affected by high horizontal stresses. *Sixth International Seminar on Deep and High Stress Mining*. Perth, Australia, 8–30 March 2012. pp. 443–450.
15. Wang Li, Zhang Xiu-feng. Correlation of ground surface subsidence characteristics and mining disasters under super-thick overlying strata. *Journal of China Coal Society*, 2009, vol. 34, no. 8, pp. 1048–1051.
16. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Geomechanical terms of use of the mill tailings for preparation. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, no. 4, pp. 321–324.
17. Protosenya A.G., Kuranov A.D. Methods of predicting the stress-strain state of rock mass at the combined development of Koshvinskoe field. *Mining journal*, 2015, no. 1, pp. 90–93. In Rus.
18. Zhukova S.A., Samsonov A.V. Assessing the impact of environmental factors on the expression of seismicity of Khibiny massif. *Mining journal*, 2014, no. 10, pp. 123–126. In Rus.
19. Neroba A.V., Marysjuk V.P., Oparin V.N., Tapsiev A.P. Methodological bases of constructing information and monitoring systems of geodynamic safety at the mining enterprises. *Mining journal*, 2015, no. 6, pp. 89–92. In Rus.
20. Hencher S. *Practical Engineering Geology*. Abingdon; New York, Spon Press, 2012. 450 p.

Received: 16 February 2016.

Information about the authors

Vladimir I. Golik, Dr. Sc., professor, North-Caucasian State Technological University; chief research scientist, Geophysical Institute of Vladikavkaz scientific center of the RAS.

Takhir T. Ismailov, Dr. Sc., professor, Tax Academy of the Russian Federation.

Sergey G. Stradanchenko, Dr. Sc., professor, rector, Don State Technical University.

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

УДК 621.039.51

АДАПТАЦИЯ МЕТОДА k0-ИНАА ДЛЯ РЕАКТОРА ИВГ.1М

Алейников Юрий Владимирович¹,
aleinikov@nnc.kz

Попов Юрий Анатольевич¹,
Popov@nnc.kz

Медетбеков Берик Сакенович¹,
medetbekov@nnc.kz

Кожыханов Сымбат Балтабекович¹,
kozhakhanov@nnc.kz

¹ Институт атомной энергии НЯЦ РК,
Казахстан, 711100, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 10.

Актуальность работы состоит во внедрении компараторного метода k0-стандартизации инструментального нейтронно-активационного анализа (k0-ИНАА) при проведении исследований на реакторе ИВГ.1М, что позволит расширить область его применения. Метод k0-ИНАА характеризуется надежностью и технологичностью всех этапов анализа. При проведении исследования будет приобретен уникальный опыт адаптации прикладных методик.

Цель работы: адаптация k0-ИНАА для элементного анализа различных материалов при использовании исследовательского реактора ИВГ.1М с учетом условий облучения, физических и технических особенностей реактора.

Методы исследования: компараторный метод k0-ИНАА; характеристика мест облучения в экспериментальном канале реактора ИВГ.1М (определение параметров α и f); выбор оптимальных режимов облучения образцов горных пород; подготовка и облучение образцов горных пород в экспериментальном канале реактора ИВГ.1М; обработка и анализ экспериментальных данных.

Научная новизна. Апробирован метод на реакторе ИВГ.1М, определены характеристики поля нейтронов в экспериментальном канале реактора ИВГ.1М для расчета концентрации элементов по методу k0-ИНАА.

Результаты. Определены концентрации элементов-аналитов в стандартных образцах горных пород методом k0-ИНАА. Исследованы поля тепловых и резонансных нейтронов на реакторе ИВГ.1М, рассчитаны значения параметров α и f для определения концентрации по методу k0-ИНАА. Определено содержание элементов-аналитов в стандартных образцах горных пород, приведены отношения расчетных и аттестованных значений концентраций элементов. Оценка точности анализа выражена в виде Z-критерия и рассчитана для элементов аналитов. Для большинства аналитических результатов значения Z-критерия находятся в пределах от 0 до 2. Таким образом, результаты элементного анализа показали хорошее согласие между аналитическими и аттестованными значениями концентрации элементов-аналитов.

Ключевые слова:

Реактор ИВГ.1М, k0-ИНАА, характеристика мест облучения, стандартные образцы горных пород, концентрация элемента-аналита, расчет погрешности, Z-критерий.

Введение

В сравнении с традиционно применяемым классическим нейтронно-активационным анализом полуабсолютный метод k0-стандартизации или метод k0-ИНАА имеет целый ряд преимуществ. Так, метод k0-стандартизации заслуживает особого внимания при серийном определении большого числа элементов в пробах, когда использование эталонов для анализа требует больших затрат труда и времени на различные подготовительные операции, измерение активности либо когда эталоны отсутствуют вообще.

При использовании метода k0-ИНАА для определения элементного состава образцов отпадает необходимость в многоэлементных стандартах, как этого требует классический относительный метод эталонов. Кроме того, этот метод обеспечивает воспроизводимость результатов анализов и

точность на том же уровне, что и метод эталонов. Особенно метод предпочтителен, когда интенсивность активирующего излучения (поток нейтронов) в одной серии анализов меняется от одного облучения к другому. Даже с появлением самых передовых ядерно-физических методов анализа элементного состава различных материалов нейтронно-активационные методы анализа по-прежнему состоят в арсенале исследователей многих стран мира. Основные работы, связанные с применением метода k0-ИНАА, публикуются в ряде журналов, таких как Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Radiation Measurements and Applied Radiation and Isotopes и др. [1–7].

В данной работе представлены результаты адаптации метода k0-ИНАА на исследовательском реакторе ИВГ.1М с использованием стандартных образцов горных пород.

Экспериментальная часть

Полуабсолютный метод КО-ИНАА требует предварительного знания некоторых характеристик поля нейтронов для определения эффективного сечения (n, γ) реакций на изотопах элементов-аналитов. Это параметры, входящие в основное расчетное соотношение: α – коэффициент, определяющий степень отличия формы спектра надтепловых нейтронов от идеального спектра Ферми, и f – отношение теплового и надтеплового потоков в канале.

Характеристики поля нейтронов в месте облучения образцов в экспериментальном канале реактора ИВГ.1М определялись активационным методом с использованием активационных индикаторов (АИ). Исследования включали в себя следующие этапы:

- подготовку АИ к облучению в реакторе;
- облучение АИ в реакторе;
- измерение гамма-спектра облученных АИ;
- измерение гамма-спектра образцовых источников и калибровку спектрометра;
- определение скорости реакции на изотопах АИ;
- расчет плотности потока тепловых нейтронов;
- расчет параметра поля надтепловых нейтронов α , определяющего степень отличия формы спектра надтепловых нейтронов от идеального 1/E-спектра;
- расчет отношения плотности потока тепловых и надтепловых нейтронов f .

Параметр f был определен методом кадмиевого отношения. Применение кадмиевого фильтра и нескольких резонансных индикаторов позволило выполнить одновременное определение параметров f и α . Были использованы наборы АИ, перекрывающие энергетический диапазон нейтронов от 1,6 эВ (индий) до 6200 эВ (цирконий): Au, Cu, In, Lu, Mn, Ru, Ta, Zr [8–11].

Среднее значение параметра α по результатам двух реакторных экспериментов составило 0,0038. Среднее значение f составило приблизительно 41.

В качестве референсных материалов были выбраны стандартные образцы горных пород (СО) [12–15], которые облучались в экспериментальном канале реактора совместно с золотосодержащим

компаратором. Контейнер с образцами находился на уровне центра активной зоны реактора.

Образцы, предназначенные для облучения в реакторе, подвергались процедуре гомогенизации (последовательное измельчение, размол, перемешивание, просеивание и сушка) и дальнейшей расфасовке в полиэтиленовые пакеты.

Мощность реактора при облучении составила 0,3 МВт, время облучения – 4000 с.

После облучения образцы проб переупаковывались в «чистые» полиэтиленовые пакеты для измерений. Измерение спектров гамма-излучения образцов проводилось на многоканальном спектрометре с полупроводниковым детектором из особо чистого германия через 1–3 сут., 6–9 сут. и 30 сут. после окончания облучения. Экспозиция при измерениях составила от 600 до 85 000 с.

Анализ результатов экспериментов

Концентрация элемента-аналита в анализируемом образце определялась в соответствии с основным уравнением [16]:

$$C_a = C_m \frac{\left(\frac{N_p/t_c}{SDCW} \right)_a}{\left(\frac{N_p/t_c}{SDCW} \right)_m} \frac{1}{k_{0,a}} \frac{1 + \theta_{0,m}(\alpha)/f \varepsilon_m}{1 + \theta_{0,a}(\alpha)/f \varepsilon_a}, \quad (1)$$

где символы a и m относятся к элементу-аналиту в образце и монитору соответственно; C_a , C_m – концентрации элемента-аналита в образце и референсного элемента монитора соответственно, мкг·г⁻¹; N_p – площадь пика полного поглощения (ППП), имп.; t_c – время экспозиции, с; S – поправка, учитывающая насыщение за время облучения, отн. ед.; D – поправка, учитывающая распад радиоактивного изотопа элемента-аналита за время «охлаждения» t_{cool} , отн. ед.; C – поправка, учитывающая распад радиоактивного изотопа элемента-аналита за время измерения, отн. ед.; W – масса образца (монитора), г; $k_{0,a}$ – экспериментально определенные константы для элемента-аналита и монитора (для монитора из золота $k_{0m}=1$) [17–19]; $\theta_{0,m}$, $\theta_{0,a}$ – физические константы, определяющие

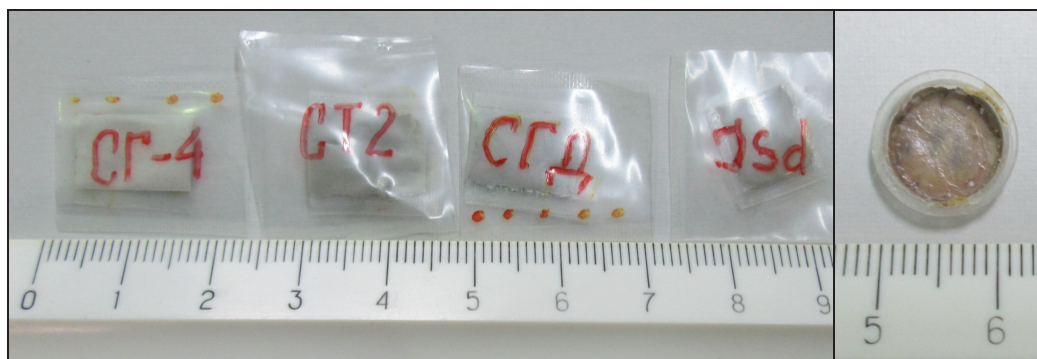


Рис. 1. Стандартные образцы горных пород и золотосодержащий компаратор

Fig. 1. Standard materials of rocks and gold-bearing comparator

отношение сечений для эпитепловых и тепловых нейтронов для монитора и аналита соответственно [17–19]; f – отношение потоков тепловых и эпитепловых нейтронов в местах облучения, отн. ед. (для ИВГ.1М $f=40$); $\varepsilon_m, \varepsilon_a$ – эффективность регистрации гамма-квантов радиоактивных изотопов монитора и элемента-аналита, отн. ед.

Следующим этапом анализа был расчет погрешности результатов определения концентрации элементов-аналитов. При этом решались следующие задачи:

- анализ и оценка погрешностей исходных величин, входящих в расчетные соотношения;
- оценка точности результата анализа с помощью Z -критерия.

Расчет относительной погрешности определения концентрации элемента-аналита в образце (δC_a) проводился в соответствии с [20–22]. Основные принципы методики расчета погрешности, приведенной в [20]:

- 1) полная погрешность результата измерений определяется как сумма случайной и систематической погрешностей, приведенных к одинаковой доверительной вероятности $p=0,68$;
- 2) закон распределения составляющих случайной погрешности результата – нормальный;
- 3) закон распределения составляющих систематической погрешности – равномерный.

Полная погрешность результата рассчитывалась исходя из погрешности сомножителей правой части уравнения (1):

$$\delta C = \sqrt{\sum_l S_l^2} + 1,1 \sqrt{\sum_m \theta_m^2}, \quad (2)$$

где l, m – количество слагаемых; S_l – случайная относительная погрешность сомножителя; θ_m – систематическая погрешность (максимальная граница).

Абсолютная погрешность определения концентрации элемента-аналита в образце ΔC_a рассчитывалась по формуле

$$\Delta C_a = \delta C \cdot C_a / 100, \quad (3)$$

где δ – относительная погрешность определения концентрации элемента-аналита.

Точность результата анализа, проведенного методом инструментального нейтронно-активационного анализа, в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ [23], может быть оценена путем сравнения результата количественного анализа СО с аттестованными значениями, приведенными в сертификатах. Оценка точности анализа выражается в виде Z -критерия, который представляет собой разность полученного результата и аттестованного значения с учетом неопределенности полученного результата и абсолютной погрешности аттестованного значения, приведенного в сертификате. Z -критерий рассчитывается в соответствии с выражением

$$Z_i = \frac{C_i - C_{ref\ i}}{\sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_{ref\ i}^2}}, \quad (4)$$

где C_i, σ_i – полученные расчетные значения концентрации и их погрешности; $C_{ref\ i}, \sigma_{ref\ i}$ – сертифицированные значения концентрации элементов и их погрешности соответственно.

В случае если $Z < 2$, результат анализа считается приемлемым. Если $2 < Z < 3$, то результат анализа можно рассматривать как «ориентировочный», и если $Z > 3$, то результат считается неприемлемым [23].

Результаты количественного анализа методом КО-ИНАА приведены в таблице.

Таблица. Результаты расчета концентрации элементов-аналитов ($\mu\text{г}\cdot\text{г}^{-1}$) и Z -критерия

Table. Results of calculation of concentration of element-analytes ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) and Z -criterion

| Элемент Element | Catt | ΔCatt | Cexp | ΔCexp | Cexp/Catt | Z |
|---|-------|---------------------|-------|---------------------|-----------|------|
| Время выдержки образцов – 1 сут. Cooling time of samples is 1 day | | | | | | |
| Ga | 26 | 4 | 24,9 | 6,5 | 0,96 | 0,14 |
| K | 4,27 | 0,06 | 4,15 | 0,31 | 0,97 | 0,38 |
| Na | 3,06 | 0,1 | 3,04 | 0,16 | 0,99 | 0,11 |
| Время выдержки образцов – от 5 до 10 сут. Cooling time of samples is from 5 to 10 days | | | | | | |
| As | 6,6 | 2,3 | 6 | 0,94 | 0,91 | 0,24 |
| Au** | HA | – | <ПО | – | – | HO |
| Ba | 123 | 16 | 106 | 19 | 0,86 | 0,68 |
| Br | HA | – | <ПО | – | – | HO |
| Ca | 0,315 | 0,14 | <ПО | – | – | HO |
| Ho | 2,6 | 0,5 | 2,92 | 0,6 | 1,12 | 0,41 |
| La | 91 | 7 | 91,5 | 5 | 1,01 | 0,06 |
| Lu | 1,3 | 0,3 | 2,54 | 0,16 | 1,95 | 3,65 |
| Nd | 84 | 14 | 91,5 | 8,9 | 1,09 | 0,45 |
| Rb | 194 | 8 | 177 | 15 | 0,91 | 1,00 |
| Sm | 19 | 3 | 18,8 | 1 | 0,99 | 0,06 |
| U | 6,8 | 0,9 | 6,24 | 0,5 | 0,92 | 0,54 |
| W | 3 | 0,5 | <ПО | – | – | HO |
| Yb | 7,4 | 1,4 | 8,6 | 0,46 | 1,16 | 0,81 |
| Время выдержки образцов – до 30 сут. Cooling time of samples is to 30 days | | | | | | |
| Eu | 0,64 | 0,06 | 0,639 | 0,06 | 1,00 | 0,01 |
| Ce | 177 | 27 | 221 | 11 | 1,25 | 1,51 |
| Co | 0,9 | 0,2 | 0,83 | 0,12 | 0,92 | 0,30 |
| Cr | 29,4 | 3,4 | 35 | 2,2 | 1,19 | 1,38 |
| Cs | 6,7 | 0,7 | 6,8 | 0,46 | 1,01 | 0,12 |
| Fe | 2,14 | 0,02 | 2,29 | 0,13 | 1,07 | 1,14 |
| Hf | 18 | 2 | 17 | 0,93 | 0,94 | 0,45 |
| Sb | 0,6 | 0,4 | 0,48 | 0,12 | 0,80 | 0,29 |
| Sc | 1,9 | 0,4 | 1,78 | 0,1 | 0,94 | 0,29 |
| Se | HA | – | <ПО | – | – | HO |
| Sr | 34 | 7 | <ПО | – | – | HO |
| Ta | 1,7 | 0,3 | 1,58 | 0,14 | 0,93 | 0,36 |
| Tb | 2,5 | 0,3 | 2,4 | 0,14 | 0,96 | 0,30 |
| Th | 20 | 3 | 21,9 | 1,2 | 1,1 | 0,59 |
| Zn | 145 | 6 | 142 | 9,9 | 0,98 | 0,26 |
| Zr | 710 | 50 | 712 | 76 | 1 | 0,02 |

*Концентрация в %; <ПО – меньше предела обнаружения; HA – не аттестован; HO – не обнаружен.

*Concentration is in %; <ПО – less than the detection limit; HA – not certified; HO – not found.

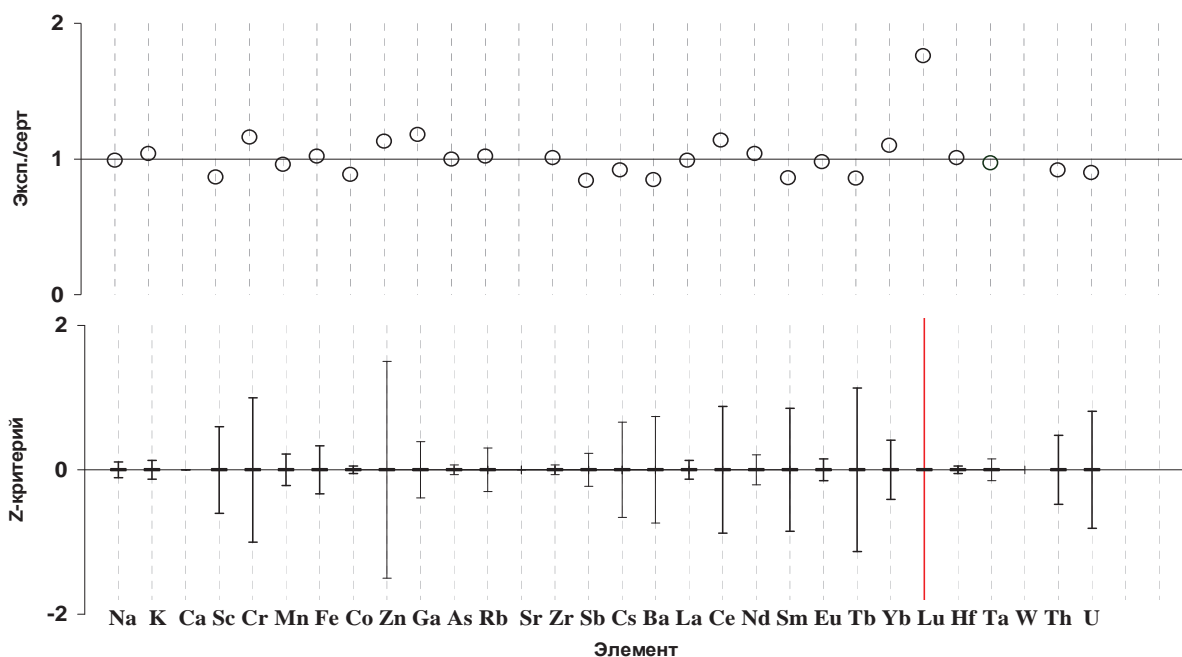


Рис. 2. Результаты расчета отношения $C_{\text{эксп}}/C_{\text{серт}}$ и Z-критерия

Fig. 2. Results of calculation of experimental to certificate concentration ratio and Z-criterion

В качестве иллюстрации ниже в графическом виде приведены результаты расчета Z-критерия и отношение значений концентрации элементов в СО, полученные расчетно-экспериментальным путем, к паспортным значениям.

Заключение

Проведены расчетно-экспериментальные исследования с целью адаптации метода k0-ИНАА для реактора ИВГ.1М. Определены концентрации элементов-аналитов в СО и отношения расчетных и аттестованных значений.

Проведенный анализ показывает, что для таких элементов, как Ca, K, Na, Ho, Eu, Fe, La, Sm, Co, Cs, Hf, Zn и Zr, отличия экспериментально полученных значений концентрации элементов от аттестованных, составляют в среднем не более 5%. Для таких элементов, как As, Nd, Rb, U, Th, Cr, Sc, Tb, Yb и Sb, значения концентраций отлича-

ются на 10–15%, а для Ga, Ba, Ce и Se соответствующие отличия составляют от 20 до 35%.

Точность определения концентрации элементов в СО была оценена с помощью Z-критерия. Кроме лютеция, для всех определенных элементов-аналитов значение Z-критерия находится в пределах от 0 до 2. Таким образом, результаты элементного анализа, полученные методом k0-ИНАА, показали хорошее согласие между расчетными и аттестованными значениями концентрации элементов-аналитов. Полученные удовлетворительные результаты элементного анализа СО методом k0-ИНАА позволяют утверждать об адаптации метода на реакторе ИВГ.1М.

В дальнейшем на реакторе ИВГ.1М предполагается проведение исследований по определению содержания примесей в конструкционных материалах ядерной техники, таких как графит, бериллий, цирконий, с использованием метода k0-ИНАА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фронгасьева М.В. Нейтронный активационный анализ в науках о жизни: обзор // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2011. – Т. 42. – № 2. – P. 636–716.
2. De Corte F. The standardization of standardless NAA. // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2001. – V. 248. – № 1. – P. 13–20.
3. Instrumental neutron activation analyses of uranium and thorium in samples from tin mining and processing sites / F.S. Olise, O.F. Oladejo, S.M. Almeida, O.K. Owoade, H.B. Olaniyia, M.C. Freitas // Journal of Geochemical Exploration. – 2014. – V. 142. – P. 36–42.
4. Experimental k0 and k0-fission factors for the determination of the n(235U)/n(238U) enrichment levels and correction for 235U

fission interferences in samples containing uranium / F. Arbocco, P. Vermaercke, K. Smits, L. Sneyers, K. Strijckmans // J Radioanal Nucl Chem. – 2014. – V. 302. – P. 721–735.

5. Yavar A., Sarmani S.B., Khoo K.S. The Better Efficiency Calibration for HPGe Detector by Comparing the Single Point Gamma Sources and Multi-nuclides Gamma Source for k0-NAA Method // Journal of Applied Physics. – 2014. – V. 6 (3). – P. 54–56.
6. Adazabra A.N., Ntiforo A., Bamford S.A. Analysis of essential elements in Pito – a cereal food drink and its brands by the single-comparator method of neutron activation analysis // Food Science & Nutrition. – May 2014. – V. 2. – Iss. 3. – P. 230–235.
7. Hamidatou L., Slamene H., Mohamed Lahcen Si. Major, minor and trace elements in four kinds of cement powder using INAA

- and k0-standardization methods // J Radioanal Nucl Chem. – 2014, May. – V. 304 (2). – P. 717–725.
8. Егоров Ю.А. Экспериментальные исследования полей нейтронов и гамма-излучений. – М.: Атомиздат, 1974. – 392 с.
 9. Методики радиационных исследований на стенде: сб. методик / под ред. У.Я. Маргулиса [и др.]; разработ.: В.Н. Грознов, Л.Л. Нефёдов, В.Т. Хрущ [и др.]. – М.: Институт биофизики Минздрава СССР, 1985. – 196 с.
 10. Mustra C.O., Freitas M.C., Almeida S.M. Neutron flux and associated k0 parameters in the RPI after the last configuration change // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2003. – V. 257. – № 3. – P. 539–543.
 11. Ho Manh Dung, Fumio Sasajima. Determination of and f for k0-NAA in irradiation sites with high thermalized neutrons // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2003. – V. 257. – № 3. – P. 509–512.
 12. Стандартный образец горной породы «Трапп». Паспорт. ГСО 8671–2005. Иркутск, 2012 г.
 13. Стандартный образец горной породы «Габбро эссекитовое». Паспорт. ГСО 8670–2005. Иркутск, 2012 г.
 14. Стандартный образец горной породы «Субщелочной гранит (СГ-4)». Паспорт. ГСО 10135–2012. Иркутск, 2012 г.
 15. GSJ Geochemical Reference samples DataBase. URL: <https://gbank.gsj.jp/geostandards/igneous.html> (дата обращения: 03.12.2015).
 16. Simonits A., De Corte F., Hoste J. Single-comparator methods in reactor neutron activation analysis // J. Radioanal. Chem. – 1975. – V. 24. – P. 31–46.
 17. De Corte F., Simonits A. k0-Measurements and related nuclear data compilation for (n,γ) reactor neutron activation analysis // J. Radioanal. Nucl. Chem. – 1984. – V. 82/2. – P. 385–452.
 18. De Corte F., Simonits A. k0-Measurements and related nuclear data compilation for (n,γ) reactor neutron activation analysis // J. Radioanal. Nucl. Chem. – 1989. – V. 133. – P. 3–41.
 19. Menno Blaauw. The k0-Consistent IRI Gamma-ray Catalogue for INAA. – Delft: Interfaculty Reactor Institute, 1996. – 142 p.
 20. Внутрореакторная дозиметрия: практическое руководство / Б.А. Брисман, В.В. Генералов, Е.А. Крамер-Агеев, В.С. Трошин. – М.: Энергоиздат, 1985. – 200 с.
 21. Метрология нейтронных измерений на ядерно-физических установках / под ред. Р.Д. Васильева // Материалы I Всесоюзной школы. Т. 2. – М.: ЦНИИАТОМ-ИНФОРМ, 1976. – 176 с.
 22. Тустановский В.Т. Оценка точности и чувствительности акти-вационного анализа. – М.: Атомиздат, 1976. – 192 с.
 23. Quality aspects of research reactor operations for instrumental neutron activation analysis / Ed. by E.H.K. Akaho, P. Bode, Dodd Bdu, J.F. Bruyn, B. Saichi, M.K. Shaat // IAEA-TECDOC-1218. – Vienna, 2001. – P. 60.

Поступила 03.02.2016 г.

Информация об авторах

Алейников Ю.В., начальник лаборатории физики реакторных установок Института атомной энергии НЯЦ РК.

Попов Ю.А., заместитель начальника лаборатории физики реакторных установок Института атомной энергии НЯЦ РК.

Медетбеков Б.С., инженер 2-й категории лаборатории физики реакторных установок Института атомной энергии НЯЦ РК.

Кожуханов С.Б., младший научный сотрудник лаборатории физики реакторных установок Института атомной энергии НЯЦ РК.

UDC 621.039.51

ADAPTATION OF k₀-INAA METHOD TO IVG.1M REACTOR

Yuriy V. Aleynikov¹,
aleynikov@nnc.kz

Yuriy A. Popov¹,
Popov@nnc.kz

Berik S. Medetbekov¹,
medetbekov@nnc.kz

Symbat B. Kozhakhonov¹,
kozkhonov@nnc.kz

¹ National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan,
10, Krasnoarmeiskaya street, Kurchatov, 711100, Republic of Kazakhstan.

Relevance of the research consists in implementation of comparator method k₀-standardization of instrumental neutron activation analysis (k₀-INAA) when studying at the reactor IVG.1M that will expand the scope of its application. The k₀-INAA method is characterized by durability and technological effectiveness at all stages of analysis. When carrying out the investigations the unique experience to adapt the application techniques will be acquired.

The main aim of the study is to adapt the k₀-INAA to elemental analysis of various materials based on the IVG.1M reactor taking into account the conditions of exposure, physical and technical features of the reactor.

The methods used in the study: comparator method of k₀-INAA; characterization of irradiation site in experimental channel of IVG.1M reactor; determination of the parameters α and f ; selection of optimal irradiation regimes of standard rock samples; preparation and irradiation of rock samples in the experimental channel of IVG.1M reactor; processing and analysis of the experimental data.

Scientific novelty. The authors have implemented the comparator method and determined the features of neutron field in the experimental channel of IVG.1M reactor for calculating the concentration of elements by k₀-INAA method.

The results. The authors determined the concentration of analyte-elements in standard rock sample by k₀-INAA method and investigated the fields of thermal and resonance neutrons in IVG.1M reactor. The values of α and f parameters were determined for calculation of concentration by k₀-INAA method. The authors defined the content of analyte-elements standard rock samples. The paper introduces the ratios between the calculated and the certified values of element concentrations. The accuracy of analysis is expressed as Z-criterion and evaluated for analyte-elements. For the majority of analytical results Z-criterion values range from 0 to 2. Thus, the results of elemental analysis showed good agreement between the analytical and the certified values of concentration of analyte-elements.

Key words:

IVG.1M reactor, k₀-INAA, characterization of irradiation site, standard rock samples, concentration of analyte element, calculation of uncertainties, Z-criterion.

REFERENCES

1. Frontasyeva M.V. Neutron activation analysis in the life sciences: a review. *Physics of elementary particles and atom nucleus*, 2011, vol. 42, no. 2, p. 636–716.
2. De Corte F. The standardization of standardless NAA. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2001, vol. 248, no. 1, pp. 13–20.
3. Olise F.S., Oladejo O.F., Almeida S.M., Owoade O.K., Olaniyia H.B., Freitas M.C. Instrumental neutron activation analyses of uranium and thorium in samples from tin mining and processing sites. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, vol. 142, pp. 36–42.
4. Arbocco F.F., Vermaercke P., Smits K., Sneyers L., Strijckmans K. Experimental k₀ and k₀-fission factors for the determination of the n (235U)/n (238U) enrichment levels and correction for 235U fission interferences in samples containing uranium. *J Radioanal Nucl Chem.*, 2014, vol. 302, pp. 721–735.
5. Yavar A., Sarmani S. B., Khoo K.S. The Better Efficiency Calibration for HPGe Detector by Comparing the Single Point Gamma Sources and Multi-nuclides Gamma Source for k₀-NAA Method. *Journal of Applied Physics*, 2014, vol. 6 (3), pp 54–56.
6. Adazabra A.N., Ntiforo A., Bamford S.A. Analysis of essential elements in Pito – a cereal food drink and its brands by the single-comparator method of neutron activation analysis. *Food Science & Nutrition*, 2014, May, vol. 2, Iss. 3, pp. 230–235.
7. Hamidatou L., Slamene H., Mohamed Lahcen Si. Major, minor and trace elements in four kinds of cement powder using INAA and k₀-standardization methods. *J Radioanal Nucl Chem.*, 2014, May, vol. 304 (2), pp. 717–725.
8. Egorov Yu.A. *Eksperimentalnye issledovaniya poley neytronov i gamma-izlucheniya* [Experimental studies of neutron fields and gamma radiations]. Moscow, Atomizdat Publ., 1974. 392 p.
9. Metodiki radiatsionnykh issledovaniy na stende [Methods of radiation research at the stand]. Eds. U.Ya. Margulis. Moscow, Institut Biofiziki Minzdrav SSSR Publ., 1985. 196 p.
10. Mustra C.O., Freitas M.C., Almeida S.M. Neutron flux and associated k₀ parameters in the RPI after the last configuration change. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2003, vol. 257, no. 3, pp. 539–543.
11. Ho Manh Dung, Pham Duy Hien. The application and development of k₀-standardization method of neutron activation analysis at Dalat research reactor. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2010, vol. 622, pp. 381–384.
12. Standartny obrazets gornoy porody «Trapp» [Standard rock sample «Trapp»]. Passport. GSO 8671–2005. Irkutsk, 2012.
13. Standartny obrazets gornoy porody «Gabbro esseksitovoe» [Standard rock sample «gabbro esseksite»]. Passport. GSO 8670–2005. Irkutsk, 2012.

14. Standartny obrazets gornoy porody «Subshchelochnoy granit» [Standard rock sample «subalkaline granite»]. Passport. GSO 10135–2012. Irkutsk, 2012.
15. GSJ Geochemical Reference samples DataBase. Available at: <https://gbank.gsj.jp/geostandards/igneous.html> (accessed 03 December 2015).
16. Simonits A., De Corte F., Hoste J. Single-comparator methods in reactor neutron activation analysis. *J. Radioanal. Chem.*, 1975, vol. 24, pp. 31–46.
17. De Corte F., Simonits A. k0-Measurements and related nuclear data compilation for (n,γ) reactor neutron activation analysis. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 1984, vol. 82/2, pp. 385–452.
18. De Corte F., Simonits A. k0-Measurements and related nuclear data compilation for (n,γ) reactor neutron activation analysis. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 1989, vol. 133, pp. 3–41.
19. Menno Blaauw. The k0-Consistent IRI Gamma-ray Catalogue for INAA. Delft, Interfaculty Reactor Institute, 1996. 142 p.
20. Briskman B.A., Generalov V.V., Kramer-Ageev E.A., Troshin V.S. Vnutrireaktornaya dozimetriya: prakticheskoe rukovodstvo [Core dosimetry: a Practical Guide]. Moscow, Energoizdat Publ., 1985. 200 p.
21. Vasilev R.D. Metrologiya neytronnykh izmereniy na yaderno-fizicheskikh ustanovkakh [Methodology of neutron measurements on nuclear and physical facilities]. *Materialy I Vsesoyuznoy shkoly* [Materials of the I All-Union school]. Moscow, TSNIIA-TOMM-INFORM Publ., 1976. Vol. 2, p. 176.
22. Tustanovsky V.T. *Otsenka tochnosti i chustvitelnosti aktivatsionnogo analiza* [Assessment of accuracy and sensitivity of activation analysis]. Moscow, Atomizdat Publ., 1976. 192 p.
23. Quality aspects of research reactor operations for instrumental neutron activation analysis. Ed. E.H.K. Akaho, P. Bode, Dodd Bdu, J.F. Bruyn, B. Saichi, M.K. Shaat. *IAEA-TECDOC-1218*. Vienna, 2001. p. 60.

Received: 3 February 2016.

Information about the authors

Yuriy V. Aleynikov, Head of the Laboratory, Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan.

Yuriy A. Popov, Deputy Head of the Laboratory, Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan.

Berik S. Medetbekov, Engineer, Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan.

Symbat B. Kozhakhhanov, Junior scientist, Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan.

УДК 681.51:622.73

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РЕГРЕССИИ И МЕТОДА ГРУППОВОГО УЧЕТА АРГУМЕНТОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Баласанян Сейран Шамирович¹,
seyran@sunicom.net

Геворгян Эрмине Михайловна¹,
hermine79@rambler.ru

¹ Капанский филиал Национального политехнического университета Армении,
Армения, 3307, г. Капан, ул. Багаберд, 28.

Актуальность работы обусловлена необходимостью проведения сравнительного анализа методов регрессии и метода группового учета аргументов с целью оценки эффективности их применения при моделировании процессов переработки полезных ископаемых.

Цель работы: оценка эффективности применения методов регрессии и метода группового учета аргументов при построении статистических моделей технологических процессов переработки полезных ископаемых на основании результатов теоретического исследования, компьютерных имитационных экспериментов и практического применения указанных методов.

Методы исследования: методы математической статистики, метод имитационного моделирования, метод индуктивного моделирования.

Результаты. Проведен сравнительный анализ методов регрессии и метода группового учета аргументов путем их теоретического исследования, компьютерных имитационных экспериментов и практического применения при построении модели, описывающей статистическую зависимость прибыли от выходных интервальных характеристик технологической системы измельчения руды Зангезурского медно-молибденового комбината. В результате логического анализа вышеупомянутых методов сделан вывод, что сравнительно высокое прогнозирующее свойство моделей, построенных методом группового учета аргументов, обеспечивается как выбором оптимальной структуры модели, так и за счет описания случайной ошибки. С помощью компьютерных имитационных экспериментов исследовано влияние объема выборки, уровня статистического шума на прогнозирующих способностях моделей, построенных с использованием обоих методов. Установлено, что сравнительно высокое прогнозирующее свойство моделей, построенных методом группового учета аргументов, проявляется особенно при умеренном статистическом шуме и малых выборках, соизмеримых с числом входных переменных. Исследованы также возможности рассмотренных методов с точки зрения выявления физических и системных закономерностей различных объектов с заданными постулированными функциями. Эффективность практического применения рассмотренных методов оценена по результатам построения технико-экономической модели технологической системы измельчения руды. Применение шагового регрессионного метода позволило построить наилучшую с точки зрения компромисса между адекватностью и сложностью модель, что свидетельствует о целесообразности применения методов регрессии при построении статистических моделей технологических процессов переработки полезных ископаемых.

Ключевые слова:

Регрессионная модель, имитационный эксперимент, селекция, многорядный полиномиальный алгоритм, полезные ископаемые, измельчение руды.

Введение

Построение математических моделей технологических процессов (ТП) добычи и переработки полезных ископаемых часто осуществляется статистическими методами [1–7]. Одной из основных проблем построения статистических моделей является выбор наилучших входных переменных и определение оптимальной структуры модели. Наряду с широко применяемыми на практике регрессионными методами выбора наилучшего состава входных переменных и структуры модели [8–13] используется также метод группового учета аргументов (МГУА) [14–23], представляющий собой дальнейшее развитие метода регрессионного анализа.

По утверждениям авторов МГУА и его пользователей, модели, построенные с применением этого метода, по своим прогнозирующим свойствам превосходят регрессионные модели, в силу того, что МГУА, благодаря применению эвристических

принципов самоорганизации, обеспечивает автоматический отбор информативных входных переменных и выбор структуры регрессионной модели оптимальной сложности, особенно при зашумленных малочисленных статистических данных.

Регрессионные методы [8–13] также позволяют выбрать наилучший состав входных переменных и структуру регрессионной модели с применением статистических критериев при рассмотрении в качестве дополнительных входных переменных преобразованные исходные переменные и использовании комбинаторного метода порождения моделей. Заметим, что с точки зрения возможности и эффективности применения построенных моделей для целей управления, наряду с прогнозирующим свойством, большое значение имеет степень их ответственности системным закономерностям моделируемого процесса, что, как правило, обеспечивается при использовании регрессионных методов.

В данной работе проведен сравнительный анализ методов регрессии и МГУА с целью оценки эффективности их применения при построении статистических моделей ТП переработки полезных ископаемых.

Теоретическое исследование методов регрессии и МГУА

При классическом регрессионном анализе постулированная модель представляется в следующем виде [8–13]:

$$\tilde{y} = G(\tilde{x}, \beta) + \tilde{\varepsilon}, \quad (1)$$

где $\tilde{x}=(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_m)$ – вектор входных (независимых) переменных; \tilde{y} – случайная выходная (зависимая) переменная; $\beta=(\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m)$ – неизвестный вектор коэффициентов модели; $\tilde{\varepsilon}$ – случайная величина (случайное возмущение, ошибка, шум), формально учитывающая влияние случайных факторов. Предполагается что, как переменные модели, так и случайное возмущение распределены нормально с параметрами $M[\tilde{x}]=0, \sigma_{\tilde{\varepsilon}}^2=\sigma^2=\text{const}$.

Очевидно, что в силу действия случайных факторов постулированная модель (1) не может точно прогнозировать значение выходной переменной при заданных значениях входных переменных. Следовательно, нет оснований говорить об «истинной» модели в полном смысле слова. Обычно под «истинным» значением выходной переменной понимают его условное математическое ожидание при заданных значениях входных переменных:

$$M[\tilde{y} / x] = M[G(x, \beta)] + M[\tilde{\varepsilon}] = G(x, \beta), \quad (2)$$

где $G(x, \beta)$ – линейная модель или модель, которую можно свести к линейной по коэффициентам $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ с помощью соответствующего преобразования.

Соотношение (2) представляет собой теоретическую регрессионную модель (уравнение регрессии y относительно x). Основной задачей регрессионного анализа является выявление и приближенное математическое описание причинно-следственной зависимости $G(x, \beta)$ между выходной и входными переменными. С этой целью на основании статистических данных (выборки $\{x_i, y_{ij}\}_i^n$) методом наименьших квадратов строится статистический аналог соотношения (2) – эмпирическая регрессионная модель

$$\hat{y} = \hat{G}(x, b), \quad (3)$$

адекватность которой, т. е. степень ее соответствия статистическим данным $\{x_i, y_{ij}\}_i^n$, оценивается с помощью выборочного коэффициента детерминации (коэффициента множественной корреляции)

$$\hat{R}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}. \quad (4)$$

Показанно [8–10], что при больших выборках статистических данных ($n \gg m$) вместо (4) можно использовать следующую приближенную формулу:

$$\hat{R}^2 \approx 1 - \hat{\sigma}^2 / \hat{\sigma}_y^2.$$

Коэффициент \hat{R}^2 показывает, какая часть вариации \tilde{y} обусловлена регрессионной моделью. Из соотношения (4) следует, что максимально возможное значение коэффициента \hat{R}^2 ограничено погрешностью измерений, наличием неучтенных или неконтролируемых факторов и никак не зависит от состава входных переменных и структуры модели. Например, если 10 % вариации выходной переменной модели обусловлено погрешностью измерения переменных, то максимально возможное значение \hat{R}^2 не может превышать 0,9 при включении в модель всех входных переменных и любой структуре модели.

Однако применение МГУА при аналогичных условиях позволяет обеспечить значение \hat{R}^2 , превышающее его максимально возможное значение, как утверждают авторы метода, за счет селективного выбора информативных входных переменных и оптимального усложнения модели. На наш взгляд, при наличии статистического шума, обусловленного погрешностью измерений и неучтенными факторами, большое значение \hat{R}^2 , превышающее его максимально возможное значение, обеспечивается за счет излишнего усложнения модели, которая вместо существующей закономерности описывает случайные ошибки. Поясним сказанное на следующем простом примере. С целью установления зависимости напряжения участка цепи от сопротивления и силы тока производились эксперименты, в результате которых с определенной точностью измерялись значения силы тока и падения напряжения. Результаты экспериментов приведены на рис. 1.

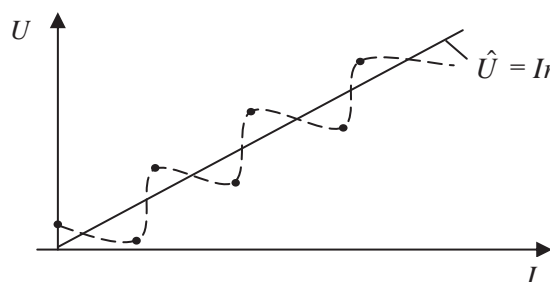


Рис. 1. Результаты экспериментов

Fig. 1. Results of the experiments

Если построить регрессионную модель на основании экспериментальных данных, то полученная зависимость с коэффициентом $\hat{R}^2 < 1$ приблизительно будет описывать известный закон Ома для участка цепи $\hat{U} = Ir$. Если же усложнить модель, например, используя в качестве аппроксимирующей функции ряд Фурье, то можно увеличить значение \hat{R}^2 до 1. Однако такая модель уже вместо существующей линейной физической закономерности будет описывать ошибки измерений. Примерно то же самое происходит при использовании МГУА,

когда простые по своей физической природе объекты, описываемые линейными или квадратичными регрессионными моделями, с целью повышения прогнозирующего свойства аппроксимируются многочленами высокого порядка (до 10–20).

В связи с вышесказанным заметим, что основной задачей моделирования, в частности идентификации объектов, является выявление и математическое описание закономерности при наличии случайных факторов и статистического шума, а не обеспечение только прогнозирующего свойства модели, на что уделяется основное внимание в МГУА.

МГУА представляет собой дальнейшее развитие регрессионного анализа и является типичным методом индуктивного моделирования, основанном на некоторых принципах теории обучения и самоорганизации, в частности на принципе «селекции» или направленного отбора. Этот метод включает семейство индуктивных алгоритмов, обеспечивающих рекурсивный селективный отбор моделей, на основе которых строятся более сложные модели. Точность моделирования на каждом следующем шаге рекурсии увеличивается за счет усложнения модели. Как правило, исходную выборку разбивают на обучающую (объемом $n_{об}$) и проверочную (объемом $n_{пр}$) выборки соотношением $n_{об}/n_{пр}=3/2$. Первая выборка используется для оценки коэффициентов модели методом наименьших квадратов (МНК), а вторая – для определения качества модели с помощью коэффициента детерминации R^2 или среднеквадратического отклонения ошибки (СКО) σ^2 (остаточной дисперсии). С каждым шагом итерации СКО уменьшается, но после достижения определенного уровня сложности, зависящего от характера и количества данных, а также общего вида модели, СКО начинает расти.

Рассмотрим более подробно процесс синтеза модели оптимальной сложности, широко используемого на практике многорядного полиномиального алгоритма МГУА [20, 22].

1. Выбирается общий вид перебираемых моделей (опорных функций) с t независимыми переменными, используя обобщенный полином Колмогорова–Габора:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i x_i + \sum_{j=1}^m \sum_{i \leq j} a_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^m \sum_{i \leq j} \sum_{k \leq j} a_{ijk} x_i x_j x_k + \dots,$$

который с высокой точностью может аппроксимировать любую непрерывную на конечном интервале функцию в виде полинома определенной степени (согласно теореме Вейерштрасса). Сложность модели в таком случае определяется количеством коэффициентов a_{ij} ($i, j=1, m, i \leq j$).

2. Используя опорные функции, строятся различные варианты моделей, включающие попарные комбинации исходных переменных, из которых составляются уравнения решающих функций, как правило, не выше второго порядка:

$$y_1 = f(x_1, x_2), \quad y_2 = f(x_1, x_3), \dots, \quad y_s = f(x_i, y_j).$$

Обычно в качестве функции f выбираются простые зависимости:

$$y(x_i, x_j) = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_j + a_3 x_i x_j$$

или

$$y(x_i, x_j) = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_j + a_3 x_i x_j + a_4 x_i^2 + a_5 x_j^2.$$

Используя обучающую выборку, методом наименьших квадратов для каждой модели определяются коэффициенты $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$. Набор полученных моделей составляет первый ряд селекции. Среди всех моделей первого ряда селекции выбираются несколько (от 2 до 10) наилучших. Качество моделей определяется коэффициентом детерминации, или СКО ошибки σ^2 , с помощью проверочной выборки.

3. Отобранные частные модели формируют множество новых переменных, которые являются исходными переменными для частных моделей второго ряда селекции: $z_1=f(y_i, y_j), z_2=f(y_i, y_k), \dots$

Коэффициенты новых моделей находятся по МНК, используя обучающую последовательность. Качество моделей оценивается с использованием проверочной последовательности, и среди них выбираются наилучшие, которые используются в качестве переменных моделей следующего, третьего ряда и т. д. Сложность общей модели возрастает от ряда к ряду. Если в качестве опорных функций используются полиномы второй степени, то на каждом шаге итерации степень результирующего полинома удваивается.

Наилучшее усложнение модели прекращается по достижении минимума СКО σ^2 (или максимума коэффициента детерминации R^2), определяемого с помощью проверочной выборки, или когда дальнейшее улучшение критерия селекции не будет превышать некоторого числа ε (параметр алгоритма).

4. На заключительном этапе, делая последовательную замену переменных, получают модель, включающую исходные переменные.

Сравнительный анализ метода шаговой регрессии и МГУА с помощью имитационных экспериментов

С целью сравнения метода шаговой регрессии и МГУА с точки зрения их возможности выявления и описания существующих зависимостей между выходным и входными переменными различных объектов с заданными функциями $G(x, \beta)$ проводились компьютерные имитационные эксперименты.

Моделирующий алгоритм, блок-схема которого приведена на рис. 2, работает следующим образом. Блок 1 осуществляет ввод исходных данных моделирования: значения параметров μ_j, σ_j ($j=1, m$), корреляционную матрицу $\|r_{jl}\|$ ($j, l=1, m$). Блоки 2–4 осуществляют имитацию функционирования исследуемого объекта с заданной функцией $G(x, \beta)$, т. е. формируют возможные реализации вектора входных переменных $\tilde{x}=(\tilde{x}_1, \tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_m)$ методом невырожденного многомерного нормального распре-

деления [26, 27], случайного возмущения (шума) $\tilde{\varepsilon}$ и в соответствии с соотношением (1) формируют значения выходной переменной y .

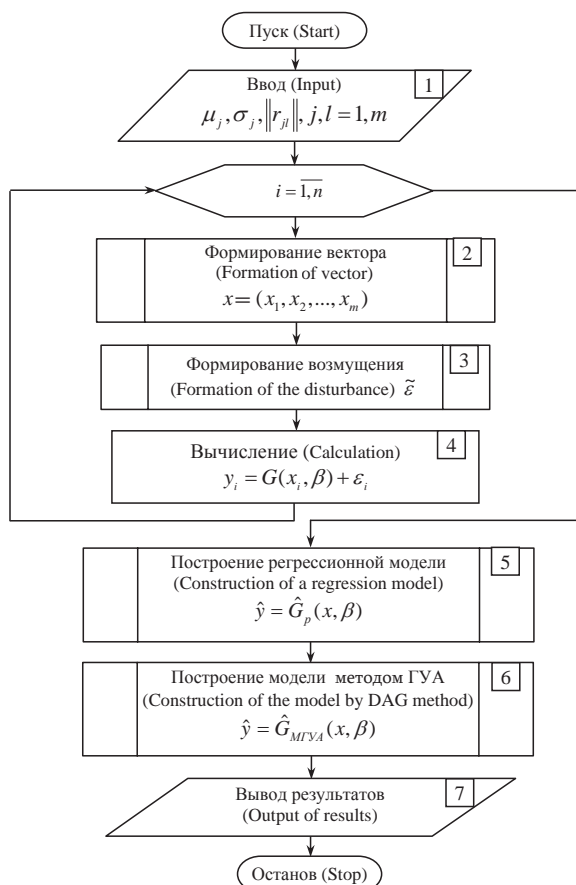


Рис. 2. Блок-схема имитационной модели

Fig. 2. Block diagram of simulation model

Далее на основании статистических данных $\{(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}, y_i): i=1, n\}$, полученных в результате имитационного моделирования исследуемого объекта, шаговым регрессионным методом и МГУА строятся регрессионная модель M_p , иерархическая многоуровневая модель $M_{\text{МГУА}}$ и вычисляются коэффициенты детерминации R_p^2 и $R_{\text{МГУА}}^2$ полученных моделей. В процессе имитационных экспериментов были рассмотрены линейные и квадратичные функции $G(x, \beta)$, при различных значениях соотношения $\hat{\sigma}^2/\hat{\sigma}_y^2=(0-0,5)$ и количестве реализаций $n=20-200$.

При построении регрессионных моделей объектов с квадратичными функциями $G(x, \beta)$ были рассмотрены дополнительные переменные, представляющие собой квадратичные формы исходных переменных первого порядка.

Построенные в результате имитационных экспериментов регрессионные модели всегда совпадали с заданными функциями $G(x, \beta)$, как первого, так и второго порядка. Значения коэффициента R_p^2 варьировались в пределах 0,5–0,81 в зависимо-

сти от значений коэффициентов корреляции между входными и выходным переменными и величинами соотношения $\hat{\sigma}^2/\hat{\sigma}_y^2$.

Построенные с помощью МГУА модели совпали с заданными функциями $G(x, \beta)$ лишь при отсутствии или незначительном уровне случайного возмущения $\tilde{\varepsilon}$ ($\hat{\sigma}^2/\hat{\sigma}_y^2=0-0,05$). При больших значениях соотношения $\hat{\sigma}^2/\hat{\sigma}_y^2$ модели, построенные методом ГУА, несмотря на достаточно большие значения $R_{\text{МГУА}}^2 (>0,9)$, не совпали с рассматриваемыми функциями $G(x, \beta)$, имели иерархическую многоуровневую (до 3–5 уровней) структуру и довольно большой порядок (6–10) исходных входных переменных. Значение коэффициента $R_{\text{МГУА}}^2$ уменьшается с увеличением значения $\hat{\sigma}^2/\hat{\sigma}_y^2$, оставаясь при этом всегда больше значения коэффициента R_p^2 регрессионных моделей.

Заметим, что сравнительно высокое прогнозирующее свойство моделей, построенных с помощью МГУА, проявляется особенно при умеренном статистическом шуме и малых выборках, соизмеримых с числом входных переменных.

Практическое применение метода шаговой регрессии и МГУА на примере системы измельчения руды

Возможности и особенности применения шаговой регрессии и МГУА рассмотрим на примере построения технико-экономической регрессионной модели, описывающей статистическую зависимость прибыли, получаемой от производства медно-молибденовых концентратов в течение 8-часового интервала (смены), от выходных интервальных характеристик технологической системы измельчения руды Зангезурского медно-молибденового комбината (ЗАО «ЗММК», Армения).

Прибыль, получаемую от производства концентратов в течение смены, можно представить в следующем виде:

$$P = D - q_1C - L, \quad (5)$$

где D – доход от реализации концентратов, выработанных в течение смены; C – условно-переменная часть затрат на переработку 1 т руды; q_1C – условно-переменная часть затрат, зависящая от массы (q_1) переработанной в течение смены руды; L – условно-постоянная часть затрат, не зависящая от объема переработки руды.

Согласно [2, 3, 5–7], к условно-переменным затратам можно отнести расходы на реагенты, шары, футеровку и другие технологические материалы, часть энергических и транспортных (внутрирудничных) затрат.

Условно-постоянные затраты включают амортизационные отчисления, расходы на капитальный ремонт, зарплату, часть энергических затрат, некоторые статьи цеховых расходов и прочие расходы, которые не вошли в состав условно-переменных затрат.

Строго говоря, условно-переменные затраты, помимо объема переработки руды, зависят (хотя

слабо) также от таких факторов, как крупность и твердость дробленой руды, крупность помола, минералогический состав и содержание металлов в руде и т. п. Однако учесть влияние этих факторов в настоящее время не представляется возможным [8]. Поэтому допускается, что условно-переменные затраты зависят только от сухой массы переработанной руды.

Таким образом, построение технико-экономической модели сводится к определению коэффициентов C , L и отысканию уравнения, описывающего зависимость дохода от реализации концентратов, выработанных в течение смены, от интервальных выходных характеристик ТСИР (q_1, q_2, q_3):

$$D = \varphi(q_1, q_2, q_3). \quad (6)$$

В настоящее время единственно возможным подходом к построению указанной выше модели является статистический, который основывается на обработке экспериментальных данных, собранных непосредственно на действующем объекте.

С целью построения статистической модели (6) совместно с работниками ЗММК в течение 180 смен было произведено апробирование процесса измельчения и параметров конечного продукта. При этом регистрировались:

- сухая масса руды (q_1), переработанной в течение смены (тонн);
- среднесменное процентное содержание класса < 80 мкм в измельченном продукте (q_2);
- среднесменная плотность объединенной пульпы (г/л) (q_3);
- вес готового молибденового концентрата γ_{Mo} (тонн), выработанного в течение смены, и среднесменное процентное содержание молибдена (β_{Mo}) в нем;
- вес готового медного концентрата γ_{Cu} , выработанного в течение смены (тонн), и среднесменное процентное содержание меди (β_{Cu}) в нем.

Доход от реализации концентратов, выработанных в течение смены, вычислялся по формуле

$$D = \frac{\gamma_{Mo}\beta_{Mo}}{100} C_{Mo} + \frac{\gamma_{Cu}\beta_{Cu}}{100} C_{Cu},$$

где C_{Mo} , C_{Cu} – соответственно рыночные цены на молибден и медь.

Применение метода шаговой регрессии

До того как приступить к построению модели, было проверено выполнение следующих условий, обеспечивающих корректность применения корреляционно-регрессионного анализа:

- нормальность и стационарность входного процесса $q(t) = (q_1(t), q_2(t), q_3(t))$;
- нормальность и стационарность выходного процесса $D(t)$.

При проверке гипотезы о нормальном распределении переменных модели был использован критерий χ^2 Пирсона, а проверка стационарности входного и выходного процессов была выполнена с помощью критерия Шефе [26].

Следующим важным вопросом при построении регрессионной модели $D = \varphi(q_1, q_2, q_3)$ является выбор ее структуры. Опыт практического применения корреляционно-регрессионного анализа для математического описания производственных, в частности обогатительных процессов [1–7], свидетельствует о том, что в качестве статистической модели нормально функционирующего объекта достаточно рассмотреть алгебраический полином не выше второй степени.

На основании вышесказанного, а также учитывая сравнительно невысокие значения коэффициентов вариации переменных ($v_{q_1} = 8,7\%$, $v_{q_2} = 1\%$, $v_{q_3} = 0,8\%$, $v_D = 8,3\%$), максимальная степень аппроксимирующего полинома была выбрана равной двум.

Таким образом, для построения регрессионной модели имеем следующие исходные и преобразованные переменные: D – отклик, выходная переменная; q_1, q_2, q_3 – исходные входные переменные; $q_4 = q_1 \cdot q_2$, $q_5 = q_1 \cdot q_3$, $q_6 = q_2 \cdot q_3$, $q_7 = q_2^2$, $q_8 = q_3^2$, $q_9 = q_1^2$ – преобразованные входные переменные.

Контрольные данные:

- число наблюдений – 180;
- критическое значение общего (частного) F -критерия – $F_{0,975}(1;170) = 3,9$;
- уровень риска для доверительных границ – 5 %.

При построении регрессионной модели были использованы расчетные формулы, приведенные в [8–13].

Шаговая регрессионная процедура начинается с построения простой корреляционной матрицы R . Проверка значимости полученных коэффициентов парной корреляции по критерию Стьюдента показала, что все они статистически значимы при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

| | D | q_1 | q_2 | q_3 | q_4 | q_5 | q_6 | q_7 | q_8 | q_9 |
|-----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| D | 1 | 0,61 | 0,18 | 0,30 | 0,82 | 0,62 | 0,22 | 0,12 | 0,25 | 0,60 |
| q_1 | 0,61 | 1 | -0,30 | 0,30 | 0,50 | 0,95 | -0,25 | -0,31 | 0,24 | 0,95 |
| q_2 | 0,18 | -0,30 | 1 | -0,62 | 0,45 | -0,47 | 0,95 | 0,95 | -0,62 | -0,28 |
| q_3 | 0,30 | 0,30 | 0,62 | 1 | -0,16 | 0,30 | -0,29 | -0,55 | 0,95 | 0,24 |
| $R = q_4$ | 0,82 | 0,50 | 0,45 | -0,16 | 1 | 0,50 | 0,41 | 0,40 | -0,15 | 0,51 |
| q_5 | 0,62 | 0,95 | -0,47 | 0,30 | 0,50 | 1 | -0,28 | -0,41 | 0,45 | 0,95 |
| q_6 | 0,22 | -0,25 | 0,95 | -0,29 | 0,41 | -0,28 | 1 | 0,95 | -0,28 | -0,25 |
| q_7 | 0,12 | -0,31 | 0,95 | -0,55 | 0,40 | -0,41 | 0,95 | 1 | -0,53 | -0,25 |
| q_8 | 0,25 | 0,24 | -0,62 | 0,95 | -0,15 | 0,45 | -0,28 | -0,53 | 1 | 0,20 |
| q_9 | 0,60 | 0,95 | -0,28 | 0,24 | 0,51 | 0,95 | -0,25 | -0,25 | 0,20 | 1 |

Шаг 1

1. В качестве первой независимой переменной для включения в регрессионную модель выбирается q_4 , которая наиболее сильно коррелирована с откликом:

$$\max_i \{ |r_{Dq_i}| : i = \overline{1,9} \} = |r_{Dq_4}| = 0,82.$$

2. Вычисляется значение общего F -критерия для уравнения $\hat{D} = f_1(q_4)$ по формуле

$$\hat{F}_{q_4} = \frac{R_{Dq_4}^2}{1 - R_{Dq_4}^2} (n - m - 1) = 365,2,$$

где n – число наблюдений; m – число независимых переменных регрессионного уравнения; $R_{Dq_4} = r_{Dq_4}$.

Уравнение $\hat{D}=f_i(q_4)$ является статистически значимым, так как расчетное значение F -критерия превосходит выбранное критическое значение (3,9).

3. Вычисляются остаточная дисперсия $\hat{\sigma}^2$ и коэффициент вариации отклика $\nu_{\hat{D}}$ по формулам

$$\hat{\sigma}^2 = \sigma_D^2(1 - R_{Dq_4}^2); \nu_{\hat{D}} = \frac{\hat{\sigma}}{\hat{D}} \cdot 100 = 5,05 \%$$

Шаг 2

1. Вычисляются частные коэффициенты корреляции (табл. 1) между каждой независимой переменной q_i ($i=1,9; i \neq 4$) и откликом, при условии, что переменная q_4 включена в регрессионную модель, по формуле

$$r_{Dq_i \bullet q_4} = \frac{-D_{13}^{li}}{\sqrt{D_{11}^{li} D_{33}^{li}}},$$

где $D_{13}^{li}, D_{11}^{li}, D_{33}^{li}$ – алгебраические дополнения соответствующих элементов корреляционной матрицы D^{li} :

$$D^{li} = \begin{vmatrix} 1 & r_{Dq_4} & r_{Dq_i} \\ r_{Dq_4} & 1 & r_{q_4 q_i} \\ r_{Dq_i} & r_{q_4 q_i} & 1 \end{vmatrix}.$$

Таблица 1. Коэффициенты частной корреляции

Table 1. Coefficients of private correlation

| i | 1 | 2 | 3 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------------------------------|--------|---------|-------|-------|---------|-------|--------|--------|
| $ r_{Dq_i \bullet q_4} $ | 0,146 | 0,136 | 0,611 | 0,464 | 0,052 | 0,157 | 0,433 | 0,22 |
| $ r_{Dq_i \bullet q_4 q_3} $ | 0,0067 | 0,00335 | - | 0,163 | 0,00441 | 0,017 | 0,0016 | 0,0075 |

2. Выбирается

$$\max_i \{|r_{Dq_i \bullet q_4}| : i = \overline{1,9}; i \neq 4\} = |r_{Dq_3 \bullet q_4}| = 0,611.$$

В соответствии с шаговым методом в качестве следующей переменной, претендующей для включения в регрессионную модель, выбирается q_3 , которая характеризуется наиболее высоким частным коэффициентом корреляции с откликом.

3. Вычисляется множественный коэффициент корреляции для регрессионной модели $\hat{D}=f_2(q_4, q_3)$ по формуле

$$R_{D \bullet q_4 q_3} = \sqrt{1 - \frac{D^{13}}{D^{11}}} = 0,9339,$$

где

$$D^{13} = \begin{vmatrix} 1 & r_{Dq_4} & r_{Dq_3} \\ r_{Dq_4} & 1 & r_{q_4 q_3} \\ r_{Dq_3} & r_{q_4 q_3} & 1 \end{vmatrix}.$$

4. Вычисляется значение частного F -критерия для проверки значимости вклада q_3 :

$$\hat{F}_{q_3/q_4} = \frac{(R_{D \bullet q_4 q_3}^2 - r_{Dq_4}^2)(n - m - 1)}{1 - R_{D \bullet q_4 q_3}^2} = 276,7.$$

Как видно, расчетное значение частного F -критерия превосходит табличное значение (3,9). Это свидетельствует о том, что новая переменная q_3 дает статистически значимое снижение остаточной суммы квадратов (см. табл. 3). Следовательно, переменная q_3 в регрессионной модели сохраняется.

5. Вычисляется значение частного F -критерия для проверки значимости вклада переменной q_4 , который имел бы место, если бы в модель была введена сначала q_3 , затем q_4 (вклад q_4/q_3), по формуле

$$\hat{F}_{q_4/q_3} = \frac{(R_{D \bullet q_4 q_3}^2 - r_{Dq_3}^2)(n - m - 1)}{1 - R_{D \bullet q_4 q_3}^2} = 1075.$$

Поскольку расчетное значение частного F -критерия больше критического, переменная q_4 в регрессионной модели сохраняется.

6. Вычисляется значение общего F -критерия для модели $\hat{D}=f_2(q_4, q_3)$:

$$\hat{F}_{q_4 q_3} = \frac{R_{D \bullet q_4 q_3}^2 (n - m - 1)}{(1 - R_{D \bullet q_4 q_3}^2)m} = 400,6.$$

Общий F -критерий показывает, что регрессионная модель $\hat{D}=f_2(q_4, q_3)$ является статистически значимой при уровне значимости $\alpha=0,05$.

7. Вычисляются остаточная дисперсия и коэффициент вариации отклика по формулам

$$\hat{\sigma}^2 = \sigma_D^2(1 - R_{D \bullet q_4 q_3}^2); \nu_{\hat{D}} = \frac{\hat{\sigma}}{\hat{D}} \cdot 100 = 3,15 \%$$

Шаг 3

1. Вычисляются частные коэффициенты корреляции $r_{Dq_i \bullet q_4 q_3}$ ($i = \overline{1,9}; i \neq 3, i \neq 4$) (табл. 2) между каждой переменной, не включенной в регрессионную модель, и откликом, при условии, что q_4 и q_3 уже включены в модель, по формуле

$$r_{Dq_i \bullet q_4 q_3} = \frac{-D_{14}^{2i}}{\sqrt{D_{11}^{2i} \cdot D_{33}^{2i}}},$$

где

$$D^{2i} = \begin{vmatrix} 1 & r_{Dq_4} & r_{Dq_3} & r_{Dq_i} \\ r_{Dq_4} & 1 & r_{q_4 q_3} & r_{q_4 q_i} \\ r_{Dq_3} & r_{q_4 q_3} & 1 & r_{q_3 q_i} \\ r_{Dq_i} & r_{q_3 q_i} & r_{q_4 q_i} & 1 \end{vmatrix}.$$

Выбирается

$$\max_i \{|r_{Dq_i \bullet q_4 q_3}| : i = \overline{1,9}; i \neq 3; i \neq 4\} = |r_{Dq_5 \bullet q_4 q_3}| = 0,163.$$

Следовательно, следующей переменной, претендующей на включение в регрессионное уравнение, является q_5 .

2. Вычисляется множественный коэффициент корреляции для регрессионной модели $\hat{D}=f_3(q_4, q_3, q_5)$:

$$R_{D \bullet q_4 q_5} = \sqrt{1 - \frac{D^{25}}{D_{11}^{25}}} = 0,935,$$

где

$$D^{25} = \begin{array}{ccc|c} & & & r_{Dq_5} \\ & D^{13} & & r_{q_4q_5} \\ & & & r_{q_5q_3} \\ \hline r_{Dq_5} & r_{q_4q_5} & r_{q_5q_3} & 1 \end{array}$$

3. Вычисляется значение частного F -критерия для проверки значимости вклада:

$$\hat{F}_{q_5/q_4q_3} = \frac{(R_{D \bullet q_4 q_5}^2 - R_{D \bullet q_4 q_3}^2)}{(1 - R_{D \bullet q_4 q_5}^2)}(n - m - 1) = 2,95.$$

Поскольку значение частного F -критерия меньше критического, т. е. вклад переменной q_5 является статистически незначимым при $\alpha=0,05$, то она не включается в модель и шаговая регрессионная процедура заканчивается.

Таким образом, в качестве наилучших переменных регрессионной модели выбираются q_3 и q_4 . Процесс выбора наилучших переменных компактно представлен с помощью табл. 2.

Таблица 2. Значения F -критерия и коэффициента R
Table 2. Values of F -criterion and coefficient R

| Включаемая переменная Included variable | q_4 | q_3/q_4 | q_4/q_3 | q_5/q_4q_3 |
|--|---------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Регрессионная модель на предыдущем шаге Regression model at the previous step | $\Delta = \bar{D}$ | $\Delta = f_1(q_4)$ | $\Delta = f_3(q_3)$ | $\Delta = f_2(q_4, q_3)$ |
| Регрессионная модель на данном шаге Regression model at this step | $\Delta = f_1(q_4)$ | $\Delta = f_2(q_4, q_3)$ | $\Delta = f_2(q_4, q_3)$ | $\Delta = f_4(q_4, q_3, q_5)$ |
| Общий \hat{F} -критерий General \hat{F} -criterion | 365,3 | 400,6 | 400,6 | 408,3 |
| Частный \hat{F} -критерий Private \hat{F} -criterion | 365,3 | 276,7 | 1075 | 2,95 |
| Коэффициент детерминации Coefficient of determination | 0,8199 | 0,8722 | 0,8722 | 0,8742 |
| Коэффициент вариации Coefficient of variation | 8,83 | 5,05 | 5,05 | 3,5 |

Построение регрессионной модели $\hat{D} = f_2(q_3, q_4)$ осуществляется следующим образом.

1. Методом наименьших квадратов определяются оценки стандартизованных коэффициентов выбранной регрессионной модели $\hat{\alpha}_1 = 0,8924$ и $\hat{\alpha}_2 = 0,453$, которые являются решением следующей системы линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \hat{\alpha}_1 - 0,16\hat{\alpha}_2 = 0,82, \\ -0,16\hat{\alpha}_1 + \hat{\alpha}_2 = 0,31. \end{cases}$$

2. Определяются 95%-е доверительные границы для коэффициентов $\hat{\alpha}_1$ и $\hat{\alpha}_2$ (табл. 3) по формулам:

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_{in} &= \hat{\alpha}_i - t(n - m - 1; 0,975) \hat{\sigma}_{\hat{\alpha}_i}, \\ \hat{\alpha}_{ib} &= \hat{\alpha}_i + t(n - m - 1; 0,975) \hat{\sigma}_{\hat{\alpha}_i}, \end{aligned}$$

где $\hat{\sigma}_{\hat{\alpha}_i} = (\sqrt{1 - R_{D \bullet q_4 q_3}^2}) / \sqrt{n(1 - r_{q_4 q_3}^2)} = 0,0271$.

Таблица 3. Значения коэффициентов регрессии и их доверительных границ

Table 3. Values of the regression coefficients and their confidence bounds

| Независ. перемен. Independ. variables | Стандартизованные коэффициенты регрессии Standardized regression coefficients | Стандартная ошибка коэффициентов регрессии Standard error of regression coefficients | Дов. границы для коэффициентов Confidence bounds for coefficients ($\alpha=0,05$) | | Относительная ошибка вычисления Relative error of calculations |
|--|--|---|--|-----------------|---|
| | | | верхний upper | нижний lower | |
| q_4 | 0,6385 | 0,0553 | 0,7465 | 0,5305 | 17 % |
| q_3 | 0,30554 | 0,553 | 0,4134 | 0,1974 | 35 % |

3. Вычисляются оценки натуральных коэффициентов уравнения регрессии по формулам:

$$\hat{b}_1 = \frac{\hat{\sigma}_D}{\hat{\sigma}_{q_4}} \hat{\alpha}_1; \hat{b}_2 = \frac{\hat{\sigma}_D}{\hat{\sigma}_{q_3}} \hat{\alpha}_2; \hat{b}_0 = \bar{D} - \hat{b}_1 \bar{q}_4 - \hat{b}_2 \bar{q}_3.$$

4. Определяются 95%-е доверительные границы для коэффициентов \hat{b}_1 и \hat{b}_2 по формулам:

$$\begin{aligned} \hat{b}_{1в/н} &= \hat{b}_1 \pm t(n - m - 1; 0,975) \frac{\hat{\sigma}_{\hat{\alpha}_1}}{\hat{\sigma}_{q_4}} \hat{\sigma}_D, \\ \hat{b}_{2в/н} &= \hat{b}_2 \pm t(n - m - 1; 0,975) \frac{\hat{\sigma}_{\hat{\alpha}_2}}{\hat{\sigma}_{q_3}} \hat{\sigma}_D. \end{aligned}$$

5. Определяется ширина 95%-го доверительного интервала единичного предсказания для регрессионной модели при значениях $q_4 = \bar{q}_4$ и $q_3 = \bar{q}_3$ по формуле

$$\Delta D = t(n - m - 1; 0,975) \hat{\sigma} \sqrt{\frac{n+1}{n}} \approx 2\hat{\sigma}.$$

Относительная погрешность единичного предсказания по уравнению регрессии для $q_4 = \bar{q}_4$ и $q_3 = \bar{q}_3$, определяемая как $\frac{\Delta D}{\bar{D}} 100$ %, составляет 6,315 %.

Теперь рассмотрим вопросы оценки адекватности и работоспособности построенной модели. Известно [9, 10, 13], что не всякая статистически значимая регрессионная модель обязательно пригодна для прогнозирования или управления. Действительно, если размах отклика \hat{D} незначительно превосходит величину случайной ошибки, предсказание не будет иметь никакой ценности, так как, несмотря на значимость, такая модель будет описывать только ошибки. Поэтому, для того чтобы модель можно было считать удовлетворительной для целей предсказания, расчетное значение общего F -критерия должно не просто превышать выбранную процентную точку, а превосходить ее примерно в четыре раза [9].

В соответствии с вышесказанным полученная регрессионная модель адекватна, поскольку расчетное значение общего F -критерия в 200 раз превосходит процентную точку $F_{0,95}(2;177)=2,95$, обладает достаточно хорошей прогнозирующей способностью ($\hat{R}^2=0,8834$) и вполне пригодна для предсказания величины дохода D по заданным значениям интервальных выходных характеристик системы измельчения.

6. Составляется таблица дисперсионного анализа (табл. 4) регрессионной модели.

Таблица 4. Показатели дисперсионного анализа

Table 4. Indicators of variance analysis

| Источник рассеяния Source of scattering | Степень свободы Degree of freedom | Сумма квадратов Sum of squares | Средний квадрат Mean square | Значение F -критерия The value of F -criterion |
|---|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---|
| Общий Total | 179 | 1 | – | – |
| Обусловленный регрессией Due to regression $\hat{D}=f(q_4, q_3)$ | 3 | 0,8722 | 0,291 | 400,6 |
| Обусловленный q_4 Due to variable q_4 | 1 | 0,6724 | 0,6724 | 365,3 |
| Обусловленный q_3/q_4 Due to variable q_3/q_4 | 1 | 0,1998 | 0,1998 | 276,7 |
| Обусловленный q_4/q_3 Due to variable q_4/q_3 | 1 | 0,776 | 0,776 | 1045 |
| Обусловленный q_5/q_4q_3 Due to variable q_5/q_4q_3 | 1 | 0,021 | 0,0021 | 2,95 |
| Остаток Residue | 176 | 0,1278 | 0,00073 | – |

Определив по данным калькуляции себестоимости медного и молибденового концентратов значения C и L указанным ранее образом и подставив их в (5), получим технико-экономическую регрессионную модель для прогнозирования прибыли.

В нормированном масштабе эта модель имеет следующий вид:

$$P = q_1(0,039q_2 - 0,433) + 113,7q_3 - 170499. \quad (7)$$

Построенная регрессионная модель компактна и с точки зрения компромисса между адекватностью и сложностью обладает структурой оптимальной сложности, что позволяет использовать ее как для целей прогнозирования, так и для управления.

Применение МГУА

Теперь для разработки технико-экономической модели будем использовать описанный ранее многомерный полиномиальный алгоритм МГУА.

При построении модели имеем следующие исходные данные:

- D – отклик, выходная переменная;
 - q_1, q_2, q_3 – входные переменные;
 - число наблюдений – 180;
 - объем обучающей выборки – 108;
 - объем проверочной выборки – 72.
1. Выбирается общий вид перебираемых моделей (опорных функций) с m независимыми переменными, используя обобщенный полином Колмогорова–Габора второго порядка:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i q_i + \sum_{j=1}^m \sum_{i \leq j} a_{ij} q_i q_j.$$

Используя опорные функции, строятся возможные варианты моделей, включающие попарные комбинации исходных переменных, из которых составляются уравнения решающих функций не выше второго порядка:

$$y(q_i, q_j) = a_0 + a_1 q_i + a_2 q_j + a_3 q_i q_j + a_4 q_i^2 + a_5 q_j^2,$$

$$y_1 = f_1(q_1, q_2) = a_0^{(1)} + a_1^{(1)} q_1 + a_2^{(1)} q_2 + a_3^{(1)} q_1 q_2 + a_4^{(1)} q_1^2 + a_5^{(1)} q_2^2,$$

$$y_2 = f_2(q_1, q_3) = a_0^{(2)} + a_1^{(2)} q_1 + a_2^{(2)} q_3 + a_3^{(2)} q_1 q_3 + a_4^{(2)} q_1^2 + a_5^{(2)} q_3^2,$$

$$y_3 = f_3(q_2, q_3) = a_0^{(3)} + a_1^{(3)} q_2 + a_2^{(3)} q_3 + a_3^{(3)} q_2 q_3 + a_4^{(3)} q_2^2 + a_5^{(3)} q_3^2.$$

2. Используя обучающую выборку, методом наименьших квадратов для каждой модели определяются коэффициенты $a_0^{(k)}, a_1^{(k)}, a_2^{(k)}, a_3^{(k)}, a_4^{(k)}, a_5^{(k)}$, ($k=1,3$).

Набор полученных моделей составляет первый ряд селекции. С помощью проверочной выборки определяются коэффициенты детерминации построенных моделей: $\hat{R}_{q_1 q_2}^2=0,738$, $\hat{R}_{q_1 q_3}^2=0,403$, $\hat{R}_{q_2 q_3}^2=0,115$, по которым оценивается качество моделей. Среди указанных моделей первого ряда селекции выбираются два наилучшие.

3. Отобранные частные модели формируют множество новых переменных y_1 и y_2 , которые являются исходными переменными для единственной модели второго ряда селекции:

$$D = \varphi(y_1, y_2) = a_0^* + a_1^* y_1 + a_2^* y_2 + a_3^* y_1 y_2 + a_4^* y_1^2 + a_5^* y_2^2.$$

Коэффициенты новой модели находятся методом наименьших квадратов, используя обучаю-

щую последовательность. Качество полученной модели оценивается коэффициентом детерминации, вычисленным с использованием проверочной выборки ($\bar{R}^2=0,9285$).

4. Делая последовательную замену переменных, получается модель с исходными переменными, которая описывает статистическую зависимость дохода от выходных интервальных характеристик ТСИР:

$$D = a_0 + a_1q_1 + a_2q_2 + a_3q_3 + a_4q_1q_2 + a_5q_1q_3 + a_6q_2q_3 + a_7q_1^2 + a_8q_2^2 + a_9q_3^2 + a_{10}q_1q_2q_3 + a_{11}q_1^2q_2 + a_{12}q_1^2q_3 + a_{13}q_1q_2^2 + a_{14}q_1q_3^2 + a_{15}q_1^3 + a_{16}q_2^3 + a_{17}q_1^2q_2^2 + a_{18}q_1^2q_3^2 + a_{19}q_1^3q_2 + a_{20}q_1^3q_3 + a_{21}q_1q_3^3 + a_{22}q_2q_3^3 + a_{23}q_1^2q_2q_3 + a_{24}q_1q_2q_3^2 + a_{25}q_1^4 + a_{26}q_2^4 + a_{27}q_3^4.$$

Подставляя построенную модель в соотношение (2), получим модель для прибыли, представляющую собой неполный полином четвертого порядка, структура которой намного сложнее по сравнению со структурой регрессионной модели (7).

Очевидно, что с точки зрения компромисса между адекватностью и сложностью построенная методом шаговой регрессии модель (7), безусловно, предпочтительнее модели, полученной с помощью МГУА, которая, обладая достаточно сложной структурой, обеспечивает небольшой прирост (5,1 %) коэффициента детерминации.

Несмотря на несложную структуру, регрессионная модель (7) обладает достаточно хорошей прогнозирующей способностью ($\bar{R}^2=0,8834$), что позволяет использовать ее в составе компьютерной модели для оценки и исследования эффективности функционирования ТСИР ЗММК с учетом влияния надежности измельчительного оборудования [6].

Выводы

На основании исследования методов регрессии и МГУА, сравнения полученных результатов проведенных имитационных экспериментов, а также учитывая опыт практического применения указанных методов при построении статистических моделей производственных процессов, в частности процессов переработки полезных ископаемых, можно сделать следующие выводы:

1. Входные и выходные параметры современных автоматизированных технологических процессов изменяются в небольших пределах, при которых вполне достаточно рассмотрение их математических моделей в виде многочлена $G(x, \beta)$ второго порядка. Как показывает практический опыт математического моделирования технологических процессов переработки полезных ископаемых, при указанных условиях более эффективно применение регрессионных методов, используемых во многих современных прикладных программных средствах статистического анализа производ-

ственных процессов (Data Mining, SPSS, Maple, StatGraphics, Statistica, MathCad, Matlab и т. п.).

2. В результате имитационных экспериментов установлено, что, несмотря на сравнительно невысокое прогнозирующее свойство, регрессионные модели всегда совпадали с заданными функциями $G(x, \beta)$, независимо от уровня случайного возмущения и объема выборки, а модели, полученные с помощью МГУА, совпадали с заданными функциями лишь при отсутствии или незначительном уровне случайного возмущения и малых выборках. Следовательно, регрессионные модели более адекватно отражают системные закономерности моделируемых процессов, обладают оптимальной структурой с точки зрения компромисса между сложностью и адекватностью и вполне пригодны для перспективного и оперативного управления технологическими процессами.
3. Применение шагового регрессионного метода позволило выбрать наилучший состав входных переменных и рациональную структуру технико-экономической модели, адекватно описывающей статистическую связь между прибылью и выходными интервальными характеристиками технологической системы измельчения руды, что свидетельствует об эффективности применения методов регрессии при построении статистических моделей технологических процессов переработки полезных ископаемых.
4. МГУА целесообразно использовать в таких случаях, когда невозможно использовать методы регрессионного анализа (при малочисленных выборках, соизмеримых с числом входных переменных, нарушении условия нормальности распределения выборки и т. п.).
5. Сравнительно высокое прогнозирующее свойство моделей, построенных с помощью МГУА, обеспечивается как выбором оптимальной структуры модели, так и за счет описания случайной ошибки. Последнее обстоятельство является основной причиной несовпадения этих моделей с постулированными функциями $G(x, \beta)$ в имитационных экспериментах.
6. Иерархические многоуровневые модели, построенные с помощью МГУА настолько громоздки и сложны, что, несмотря на их хорошее прогнозирующее свойство, практически мало пригодны для использования с целью оперативного управления современными технологическими процессами. Чрезмерная сложность этих моделей, включающих переменные высокого порядка (до 14–20), исключают возможность их исследования аналитическими методами, а применение численных методов оптимизации требует чрезмерно большого времени компьютерной реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. King R.P. Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems. 2nd ed. – Boston: Butterworth-Heinemann, 2015. – 416 p.
2. Jovanović I., Miljanović I., Jovanović T. Soft computing-based modeling of flotation processes (review) // Minerals Engineering. – 2015. – V. 84. – P. 34–63.
3. Integrated Optimization for the Automation Systems of Mineral Processing / T. Chai, J. Ding, G. Yu, H. Wang // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. – 2014. – V. 11. Iss. 4. – P. 965–982.
4. Пасечник И.А., Шек В.М. Анализ методов моделирования процессов обрушения горных пород при подземной добыче полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 6. – С. 194–198.
5. Разработка и применение АСУ процессами обогащения полезных ископаемых / В.В. Морозов, В.П. Топчаев, К.Я. Улитенко, З. Ганбаатар, Л. Дэлгэрбат. – М.: Изд. дом «Руда и Металлы», 2013. – 512 с.
6. Баласанян С.Ш. Стратифицированное моделирование сложных технологических систем. – Саарбрукен, Германия: LAP Lambert Academic Publishing, 2016. – 385 с.
7. Авдохин В.М. Основы обогащения полезных ископаемых. Т. 1. Обогащительные процессы. – М.: Изд-во «Горная книга», 2014. – 417 с.
8. Weisberg S. Applied Linear Regression. 4th ed. – Hoboken, NJ: Wiley, 2014. – 368 p.
9. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2007. – 912 с.
10. Seber G.A.F., Lee A.J. Linear Regression Analysis. 2nd ed. – Hoboken, NJ: Wiley, 2003. – 582 p.
11. Hoffmann Jh.P., Shafer K. Linear Regression Analysis. Assumptions and Applications. – Washington: NASW Press, 2015. – 240 p.
12. Bingham N.H., Fry J.M. Regression. – London: Springer, 2010. – 284 p.
13. Montgomery D.C., Peck E.A., Vining G.G. Introduction to Linear Regression Analysis. Fifth ed. – New York: Wiley, 2013. – 836 p.
14. Ivakhnenko A.G. Heuristic self-organization on problems of engineering cybernetics // Automatic. – 1970. – V. 6 (3). – P. 207–219.
15. Godfrey Onwubolu. GMDH and Implementation in C-Methodology. – London: Imperial College Press, 2015. – 303 p.
16. Atashrouz S., Pazuki G., Alimoradi Y. Estimation of the viscosity of nine nanofluids using a hybrid GMDH-type neural network system // Fluid Phase Equilibria. – 2014. – V. 372. – P. 43–48.
17. Ahmadi M.H., Ahmadi M.A., Rosen M.A. Using GMDH Neural Networks to Model the Power and Torque of a Stirling Engine // Sustainability. – 2015. – V. 7 (2). – P. 2243–2255.
18. Mueller J.-A., Lemke F. Self-Organizing Data Mining. – Hamburg: Libri, 2000. – 225 p.
19. Ivakhnenko A.G., Ivakhnenko G.A., Mueller J.A. Self-Organization of Neuronets with Active Neurons // Pattern Recogn. and Image Analysis. – 1994. – V. 4. – № 4. – P. 177–188.
20. Ивахненко А.Г., Савченко Е.А. Исследование эффективности метода доопределения выбора модели в задачах моделированием с применением МГУА // Проблемы управления и информатики. – 2008. – № 2. – С. 65–76.
21. Сарычев А.П. Системный критерий регулярности в методе группового учета аргументов // Проблемы управления и информатики. – 2006. – № 6. – С. 25–37.
22. Степашко В.С., Булгакова А.С. Обобщенный итерационный алгоритм метода группового учета аргументов // Управляющие системы и машины. – 2013. – № 2. – С. 9–26.
23. Goharriz M., Marandi S.M. An Optimized Neuro-Fuzzy GMDH System Based on Gravitational Search Algorithm for Evaluation of Lateral Ground // Int. J. Optim. Civil Eng. – 2016. – V. 6 (3). – P. 385–403.
24. Ермаков С.М. Метод Монте-Карло в вычислительной математике. Вводный курс. – СПб.: Невский диалект, 2009. – 192 с.
25. Balasanyan S.Sh., Gevorgyan H.M. The Construction of Statistical Model of a Virtual Object in the LabVIEW Environment // Proc. of 11th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation REV2014. – Porto, 26–28 Feb., 2014. – P. 291–293.
26. Кузнецова О.С. Теория вероятности и математическая статистика. Краткий курс. – М.: Изд-во «Окей-книга», 2013. – 191 с.
27. Баласанян С.Ш. Метод стратифицированной формализации сложных технологических систем со многими состояниями // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 1. – С. 6–18.

Поступила 15.01.2016 г.

Информация об авторах

Баласанян С.Ш., доктор технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе Капанского филиала Национального политехнического университета Армении.

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

UDC 681.51:622.73

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE REGRESSION METHODS AND DATA GROUP ACCOUNTING METHOD IN MODELING MINERAL PROCESSING

Seyran Sh. Balasanyan¹,
seyran@sunicom.net

Hermine M. Gevorgyan¹,
E-mail: hermine79@rambler.ru

¹ Kapan branch of National Polytechnic University of Armenia,
28, Baghaberd Street, Kapan, 3307, Armenia.

The relevance of the discussed issue is caused by the need to conduct a comparative analysis of regression methods and the data group accounting method in order to evaluate the effectiveness of their use in modeling mineral processing.

The main aim of the study is to assess the effectiveness of application of the regression methods and the data group accounting method in constructing statistical models of minerals processing based on the results of theoretical studies, computer simulation experiments and practical application of these methods.

The methods used in the study: methods of mathematical statistics, simulation method, method of inductive modeling.

The results. The authors have carried out the comparative analysis of regression methods and the data group accounting method by theoretical investigations, computer simulations and practical applications at the construction of model describing the statistical dependence of profit on the output interval characteristics of the ore grinding technological system of Zangezur Copper and Molybdenum Combine. As a result of the logical analysis of the above mentioned methods the authors concluded that a relatively high predictive property of the models constructed by the data group accounting method is ensured both by the selection of the optimal model structure, and by description of the random error. Using the computer simulation experiments the authors investigated the influence of sample size, level of statistical noise on the predictive ability of the models built using both methods. It was ascertained that a relatively high predictive ability of models constructed by the data accounting group method occurs especially at moderate statistical noise and small samples, comparable to the number of input variables. The possibilities of these methods were studied as well in terms of identifying physical and systemic regularities of various objects with the specified postulated functions. The effectiveness of the practical application of the considered methods is evaluated by the results of construction of techno-economic model of ore grinding technological system. The application of a stepwise regression method allowed constructing the best possible model in terms of a compromise between adequacy and complexity. This indicates the feasibility of applying the regression methods at constructing the statistical models of minerals processing.

Key words:

Regression model, simulation experiment, selection, multi-row polynomial algorithm, minerals, ore grinding.

REFERENCES

- King R.P. *Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*. Boston, Butterworth-Heinemann, 2014. 404 p.
- Jovanovich I., Miljanovich I., Jovanovich T. Soft computing-based modeling of flotation processes (review). *Minerals Engineering*, 2015, vol. 84, pp. 34–63.
- Chai T., Ding J., Yu G., Wang H. Integrated Optimization for the Automation Systems of Mineral Processing. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2014, vol. 11, Iss. 4, pp. 965–982.
- Pasechnik I.A., Shek V.M. Analysis methods for modeling the processes of rocks destruction in underground mining. *Mining informational and analytical bulletin*, 2010, no. 6, pp. 194–198. In Rus.
- Morozov V.V., Topchaev V.P., Ulitenko K.Ya., Ganbaatar Z., Delgerbat L. *Razrabotka i primeneniye avtomatizirovannykh sistem upravleniya protsessami obogashcheniya poleznykh iskopaemykh* [The development and application of automated control process of mineral processing]. Moscow, Ruda i Metally Publ., 2013. 512 p.
- Balasanyan S.Sh. *Stratifikatsionnoye modelirovaniye slozhnykh tekhnologicheskikh sistem* [Stratified modeling of complex technological systems]. Saarbruken, Germany, LAP Lambert Academic Publishing, 2016. 385 p.
- Avdokhin V.M. *Osnovy obogashcheniya poleznykh iskopaemykh. T. 1. Obogatitelnyye protsessy* [The fundamentals of mineral processing. Vol. 1. Mineral processing]. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2014. 417 p.
- Weisberg S. *Applied Linear Regression*. 4th ed. Hoboken, NJ, Wiley, 2014. 368 p.
- Draper N.R., Smith H. *Prikladnoy regressionnyy analiz* [Applied regression analysis]. Moscow, Vilyams Publ. house, 2007. 912 p.
- Seber G.A.F., Lee A.J. *Linear Regression Analysis*. 2nd ed. Hoboken NJ, Wiley, 2003. 582 p.
- Hoffmann Jh.P., Shafer K. *Linear Regression Analysis. Assumptions and Applications*. Washington, NASW Press, 2015. 240 p.
- Bingham N.H., Fry J.M. *Regression*. London, Springer, 2010. 284 p.
- Montgomery D.C., Peck E.A., Vining G.G. *Introduction to Linear Regression Analysis*. Fifth ed. New York, Wiley, 2013. 836 p.
- Ivakhnenko A.G. Heuristic self-organization on problems of engineering cybernetics. *Automatic*, 1970, vol. 6 (3), pp. 207–219.
- Godfrey Onwubolu. *GMDH and Implementation in C-Methodology*. London, Imperial College Press, 2015. 303 p.
- Atashrouz S., Pazuki G., Alimoradi Y. Estimation of the viscosity of nine nanofluids using a hybrid GMDH-type neural network system. *Fluid Phase Equilibria*, 2014, vol. 372, pp. 43–48.
- Ahmadi M.H., Ahmadi M.A., Rosen M.A. Using GMDH Neural Networks to Model the Power and Torque of a Stirling Engine. *Sustainability*, 2015, vol. 7 (2), pp. 2243–2255.
- Mueller J.-A., Lemke F. *Self-Organizing Data Mining*. Hamburg, Libri, 2000. 225 p.
- Ivakhnenko A.G., Ivakhnenko G.A., Mueller J.A. Self-Organization of Neuronets with Active Neurons. *Pattern Recogn. and Image Analysis*, 1994, vol. 4, no. 4, pp. 177–188.

20. Ivakhnenko A.G., Savchenko E.A. Issledovanie effektivnosti metoda doopredeleniya vybora modeli v zadachakh modelirovaniem s primeneniem MGUA [Studying the effectiveness of the method of regularization of a model selection in modeling problems using GMDH]. *Problems of control and Informatics*, 2008, no. 2, pp. 65–76.
21. Sarychev A.P. Sistemny kriteriyi regulyarnosti v metode gruppovogo ucheta argumentov [Regularity system criterion in the data group accounting method]. *Problems of control and Informatics*, 2006, no. 6, pp. 25–37.
22. Stepashko V.S., Bulgakova A.S. Obobshchenny iteratsionny algoritm metoda gruppovogo ucheta argumentov [Generalized iterative algorithm of the data group accounting method]. *Control systems and machines*, 2013, no. 2, pp. 9–26.
23. Goharriz M., Marandi S.M. An Optimized Neuro-Fuzzy GMDH System Based on Gravitational Search Algorithm for Evaluation of Lateral Ground. *Int. J. Optim. Civil Eng.*, 2016, vol. 6 (3), pp. 385–403.
24. Ermakov S.M. *Metod Monte-Karlo v vychislitelnoy matematike* [Monte Carlo Method in computational mathematics]. St-Petersburg, Nevsky dialekt Publ., 2009. 192 p.
25. Balasanian S.Sh., Gevorgyan H.M. The Construction of Statistical Model of a Virtual Object in the LabVIEW Environment. *Proc. of 11th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation REV2014. Porto*, 26–28 Feb., 2014. pp. 291–293.
26. Kuznetsova O.S. *Teoriya veroyatnosti i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow, Okey-kniga Publ., 2013. 191 p.
27. Balasanian S.Sh. Stratified formalization method of complex multistate systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 1, pp. 6–18. In Rus.

Received: 15 January 2016.

Information about the authors

Seyran Sh. Balasanian, Dr. Sc., associate professor, Kapan branch of National Polytechnic University of Armenia.

Hermine M. Gevorgyan, professor, Kapan branch of National Polytechnic University of Armenia.

УДК 556.16

МИНИМАЛЬНЫЙ СТОК ИРТЫША В РАВНИННОЙ ЧАСТИ БАСЕЙНА НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

Бейсембаева Манира Аманкельдиевна¹,

manira_ter@mail.ru

Дубровская Лариса Ивановна¹,

dubrli@sibmail.com

Земцов Валерий Алексеевич¹,

zemtsov_v@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

В гидрополитике России Иртыш, как трансграничная река, является предметом переговоров на разных уровнях по проблеме совместного использования водных ресурсов с Республикой Казахстан и Китаем. В результате ввода в строй Верхне-Иртышского каскада водохранилищ в равнинной части бассейна Иртыша прослеживается ухудшение экологического состояния, в частности пойменных земель, имеющих огромное значение в качестве источника кормовых ресурсов для сельскохозяйственного производства. Поэтому актуальным является анализ современного состояния и изменений различных характеристик гидрологического режима реки, в том числе минимального стока.

Цель работы: выявление изменений водного режима и минимального стока воды р. Иртыш на равнинной части водосбора (в пределах Республики Казахстан).

Методы исследования. В работе применялся географо-гидрологический метод анализа материалов наблюдений за стоком р. Иртыш в створе п. Семиярка, расположенном на реке непосредственно ниже по течению от каскада водохранилищ, за два временных интервала: в естественных (1935–1959 гг.) и в зарегулированных (1967–2010 гг.) условиях. Использовались методы математической статистики для проверки гидрологических рядов на однородность (критерии Фишера и Стьюдента) и случайность по параметрическим и непараметрическим критериям.

Результаты. Показано, что регулирование стока воды Верхне-Иртышским каскадом водохранилищ привело к существенному уменьшению летнего минимального среднемесячного расхода (на 22 %), увеличению зимнего минимального расхода (на 78 %), перераспределению объемов стока р. Иртыш между летним (уменьшение на 38 %) и зимним (увеличение на 70 %) сезонами, и, как следствие, к ухудшению гидро-экологического состояния пойменных земель. В качестве базы сравнения использовались соответствующие характеристики стока в естественных условиях.

Ключевые слова:

Минимальный сток воды, трансграничная река Иртыш, зарегулированность стока, каскад водохранилищ, внутригодовое перераспределение стока.

За последние десятилетия в бассейне реки Иртыш на территории Республики Казахстан сформировался крупный водохозяйственный комплекс, включающий промышленность, коммунально-бытовое хозяйство, тепло- и гидроэнергетику, орошение, обводнение пастбищ, водный транспорт и рыбное хозяйство. В качестве самостоятельного потребителя выступает также канал им. К. Сатпаева (Иртыш–Караганда), подпитывающий безводные области Казахстана в бассейне р. Ишим.

В Республике Казахстан Иртыш носит название «Ертис», в кадастровых изданиях Российской Федерации часть реки до вхождения на территорию России именуется «Верхний Иртыш».

Развитие водопотребления в Республике Казахстан связано, главным образом, с темпами освоения ирригационного фонда республики и увеличением объемов отраслевого водопотребления [1].

Иртыш является трансграничным водным объектом. Истоки реки расположены на границе Китая и Монголии, на юго-западном склоне Южного Алтая. Из 4248 км общей длины реки 610 км расположены на территории Китая, 1558 км при-

надлежат Казахстану, России – около 2080 км. Изменения гидрологического режима реки [2–6], и в первую очередь увеличение изъятия стока на хозяйственные нужды затрагивает интересы трех стран и порождает проблемы в рамках международного водного законодательства [7–10].

На территории Республики Казахстан сток реки Иртыш зарегулирован Верхне-Иртышским каскадом водохранилищ: Бухтарминским (заполнение и пуск произведены в 1960–1966 гг.); Усть-Каменогорским (заполнение в 1952–1954 гг., выход на полную мощность в 1966 г.), Шульбинским (начало строительства – 1976 г., водохранилище введено в эксплуатацию в 1987–1994 гг.).

Введение в эксплуатацию Верхне-Иртышского каскада водохранилищ с целью обеспечения в первую очередь транспортно-энергетических потребностей хозяйственно-промышленного комплекса региона существенно отразилось на водном режиме пойменных земель в равнинной части бассейна Иртыша [11–14].

На территории Павлодарской области Республики Казахстан сосредоточены около 90 % пойменных массивов реки Верхний Иртыш, на кото-

рых крупные массивы заливных лугов используются хозяйствами в качестве природных сенокосов и пастбищ, обладающих огромными ресурсами кормов. Одна из основных операций каскада водохранилищ – обводнительный попуск на пойму, который важен не только как обеспечивающий обводнение пойменных пастбищ Павлодарской области Республики Казахстан и Омской области Российской Федерации, но и как носитель санитарно-экологической функции половодья, – не осуществляется в оптимальном режиме вследствие неудовлетворительного наложения расходов половодья рек Убы и Ульбы на попуски Бухтарминской ГЭС [15].

Проблема рационального использования и охраны водных ресурсов Иртыша носит сложный и многоплановый характер. За последние десятилетия опубликовано много работ по водохозяйственным проблемам в бассейне Верхнего Иртыша [2, 13, 15, 16], по изменениям его водного режима [4, 6, 11, 17, 18], качеству вод [19–20] и т. д.

Одной из самых актуальных и на сегодня практически не решенной является проблема сохранения поймы, общая площадь которой от створа Шульбинской ГЭС до границы с Россией составляет более 400 тыс. га.

Главная цель введения в 1987 году первой очереди Шульбинской ГЭС – оптимизация попусков воды на Павлодарскую и Омскую поймы, у которых не обеспечиваются режимы продолжительности стояния воды и достижение необходимой площади затопления поймы. Поэтому регулирование стока со стороны Шульбинской ГЭС распространяется в основном только на период половодья [15].

Цель данной работы состоит в оценке современного состояния меженного стока и в выявлении изменений в минимальных расходах воды р. Иртыш на равнинной части водосбора (в пределах Республики Казахстан), являющихся критическими для устойчивого существования и развития сельскохозяйственного комплекса этой территории.

Объект исследования

Река Иртыш является основным притоком реки Оби. На равнинной части ее бассейна ключевым является пост у поселка Семиярка Бескарагайского района Восточно-Казахстанской области (50°53'49"N; 78°18'52"E) (рис. 1). Это первый гидрологический пост на реке непосредственно ниже по течению от каскада водохранилищ. Измерения расходов на нем ведутся с 1903 г. с минимальными пропусками в наблюдениях (табл. 1).

Выбор гидропоста у п. Семиярка для исследования изменений в минимальном стоке реки на равнинной части бассейна определялся двумя условиями – полнотой данных по сравнению со створом у г. Павлодара и высокой значимой корреляцией между ними ($r=0,98$), т. е. колебания стока в этих двух створах реки практически синхронны.

Таблица 1. Гидрографические и гидрологические характеристики реки Иртыш у п. Семиярка

Table 1. Hydrographical and hydrological characteristics of the Irtysh River at Semiyarka

| F , км ² | L_1 , км | L_2 , км | H , м | $Q_{ср}$, м ³ /с | ε_Q , % | C_v | ε_{C_v} , % | Период наблюдений Observation period | N |
|-----------------------|------------|------------|---------|------------------------------|---------------------|-------|-------------------------|---|-----|
| 229000 | 2643 | 1605 | 148 | 897 | 1,9 | 0,19 | 7,0 | 1903–1997, 1999–2010 | 107 |

Примечание: F – площадь водосбора; L_1 – расстояние от устья; L_2 – расстояние от истока; H – средняя высота водосбора; $Q_{ср}$ – средний многолетний годовой расход воды за период наблюдений; ε_Q – относительная стандартная погрешность выборочного среднего расхода воды за весь период наблюдений; C_v – коэффициент вариации годового стока; ε_{C_v} – относительная стандартная погрешность коэффициента вариации годового стока; N – количество наблюдений.

Note. F is the catchment area; L_1 is the the distance from the river mouth; L_2 is the the distance from the river source; H is the average height of a watershed; $Q_{ср}$ is the long-term mean water discharge over the period of observations; ε_Q is the relative standard error of the sample mean water discharge for the entire period of observations; C_v is the coefficient of variation of annual runoff; ε_{C_v} is the relative standard error of the coefficient of variation of annual runoff; N is the number of observations.



Рис. 1. Река Иртыш (Ертыс) в пределах Республики Казахстан

Fig. 1. The Irtysh (Ertis) River in the Republic of Kazakhstan

Исходные данные и методика исследований

Для анализа минимальных среднемесячных расходов р. Иртыш ниже каскада водохранилищ использовались режимные гидрометрические данные по стоку в створе п. Семиярка за период 1935–2010 гг.

В практике водохозяйственного проектирования принято исключать наблюдения за стоком в годы наполнения водохранилища. Поэтому из длительного ряда наблюдений за стоком в створе п. Семиярка выбирались два периода: до строительства гидроузла – режим в естественных условиях, и после строительства гидроузла – режим в зарегулированных условиях, с близкими по величине параметрами годового стока.

Совместный анализ рядов минимального летнего и зимнего стока производился для периода наблюдений 1935–2010 гг. Так как Бухтарминское водохранилище по объему значительно превосходит Усть-Каменогорское, и на полную мощность они были выведены в 1966 г., расчетный период естественного режима принят нами с 1935 по 1959 г. включительно, а период режима в зарегулированных условиях, соответствующий совместной работе двух водохранилищ, принят с 1967 по 2010 г.

Применялись методы математической статистики для проверки однородности (параметрические критерии Фишера и Стьюдента [21]) и случайности (непараметрический критерий ранговых коэффициентов и параметрический Аббе [22]) гидрологических рядов, а также использовались критерии согласия Колмогорова–Смирнова, Лиллиефорса и Шапиро–Уилкса в пакете Statistica.

Обсуждение результатов исследования

Особенности формирования минимального стока рек бассейна Верхнего Иртыша определяются разнообразием климатических и гидрогеологических условий их водосборов. Минимальные расходы воды формируются в меженные периоды, в основном за счет грунтового питания, поэтому одним из главных факторов, определяющих величину минимального стока, является степень увлажнения территории.

Анализ минимального стока р. Иртыш у п. Семиярка показал, что годовой минимальный сток является генетически однородным. Наименьшие значения стока в году наблюдаются всегда в зимнюю межень, что является следствием уменьшения подземного питания.

В результате запуска в эксплуатацию каскада водохранилищ как у летнего, так и зимнего минимального стока за весь период наблюдений (1935–2010 гг.) произошло нарушение однородности по среднему и дисперсии при уровне значимости $p < 0,05$ (табл. 2). В естественных условиях минимальные летние и зимние расходы представляли собой однородные ряды, как по среднему, так и по дисперсии. В условиях зарегулированности в минимальном летнем стоке характер однородности не изменился, что можно объяснить значительным уменьшением его изменчивости: коэффициент вариации понизился до 0,14 (0,35 в естественных условиях) (табл. 3). У зимнего минимального стока в зарегулированных условиях эмпирический уровень значимости (однородность по среднему) незначительно превышает критический уровень значимости.

Произошли существенные изменения в структуре минимального стока. Средний многолетний расход летнего минимального стока и объем летнего стока в зарегулированных условиях уменьшились на 22 и 38 % соответственно.

Эти же характеристики у зимнего стока увеличились в сравнении с естественными условиями на 78 и 70 % соответственно (табл. 3).

Вариация минимального летнего стока претерпела также существенные изменения, перейдя из категории значительно варьирующих величин (0,35) в слабо варьирующие (0,14), что наглядно проявляется и на хронологических графиках минимального стока (рис. 2).

Изменилось и распределение минимального стока по месяцам (табл. 4). Если в естественных условиях в вегетационный период минимальные расходы наблюдались преимущественно в августе

Таблица 2. Анализ однородности по среднему и дисперсии минимального зимнего и летнего стока р. Иртыш – п. Семиярка

Table 2. Testing homogeneity of the means and variances of minimum winter and summer water discharge in the Irtysh River at Semiyarka

| Q _{min} | Mean1 | Mean2 | t-value | df | p | Valid N1 | Valid N2 | Std.Dev1. | Std.Dev2. | F-ratio | p |
|----------------------------|-------|-------|---------|----|--------|----------|----------|-----------|-----------|---------|------|
| Зимний/winter 1935–2010 | 330 | 457 | –4,7 | 67 | 0,000 | 39 | 30 | 128 | 86,8 | 2,16 | 0,03 |
| Летний/summer 1935–2010 | 867 | 697 | 3,4 | 69 | 0,001 | 39 | 32 | 272 | 97,1 | 7,84 | 0,00 |
| Зимний/winter 1935–1959 | 254 | 280 | –0,95 | 22 | 0,35 | 12 | 12 | 65 | 70 | 1,18 | 0,79 |
| Летний/summer 1935–1959 | 900 | 915 | –0,11 | 22 | 0,91 | 12 | 12 | 292 | 355 | 1,47 | 0,53 |
| Зимний/winter 1967–2010 | 445 | 507 | –2,1 | 35 | 0,0501 | 19 | 18 | 107 | 71,7 | 2,21 | 0,11 |
| Летний/summer 1967–2010 | 686 | 734 | –1,5 | 37 | 0,14 | 19 | 20 | 114 | 78,5 | 2,11 | 0,12 |

Примечание. Mean 1, 2 – среднее значение первой и второй частей ряда наблюдений соответственно; t-value – статистика Стьюдента; df – число степеней свободы ряда наблюдений; p – уровень значимости t-статистики Стьюдента; Valid N1, N2 – число наблюдений в первой и второй частях ряда соответственно; Std.Dev 1, 2 – среднее квадратическое отклонение первой и второй частей ряда соответственно; F-ratio – статистика Фишера; p – уровень значимости F-статистики Фишера.

Note. Mean 1, Mean 2 is the mean value of the first and second parts of the series of observations, correspondingly; t-value is the Student's t-test value; df=N-2 if N is the number of observations; p is the confidence level for t-value; Valid N1, N2 is the number of observations in the first and second parts of the series of observations, correspondingly; Std.Dev 1, 2 is the standard deviation of the first and second parts of the series of observations, correspondingly; F-ratio is the Fisherr's F-test ratio; p is the confidence level for F-ratio.

Таблица 3. Многолетние характеристики минимального стока в естественных (I) и зарегулированных условиях (II) в створе р. Иртыш – п. Семиарка

Table 3. Long-term characteristics of minimum and seasonal flow rates under natural (I) and regulated (II) conditions for the Irtysh River at Semiyarka

| Период/Period | *N | Q, м ³ /с | ε _Q , % | σ, м ³ /с | C _v | ε _{Cv} , % | W, км ³ | ΔQ, м ³ /с | ΔQ, % | ΔW, км ³ | ΔW, % |
|--|----|----------------------|--------------------|----------------------|----------------|---------------------|--------------------|-----------------------|-------|---------------------|-------|
| Зимний сток/Winter flow | | | | | | | | | | | |
| Естественные условия (1935–1959) Natural conditions | 24 | 267 | 5,1 | 65 | 0,25 | 3,8 | 3,45 | +208 | +78 | +2,41 | +70 |
| Зарегулированные условия (1967–2010) Regulated conditions | 37 | 475 | 3,3 | 95 | 0,20 | 2,4 | 5,86 | | | | |
| Летний сток/Summer flow | | | | | | | | | | | |
| Естественные условия (1935–1959) Natural conditions | 24 | 907 | 7,2 | 299 | 0,35 | 5,4 | 11,06 | -196 | -22 | -4,25 | -38 |
| Зарегулированные условия (1967–2010) Regulated conditions | 39 | 711 | 2,2 | 99 | 0,14 | 5,6 | 6,81 | | | | |

Примечание: *N – число наблюдений; Q – средний многолетний минимальный среднемесячный расход воды за период наблюдений; ε_Q – относительная погрешность выборочного среднего минимального расхода; σ – среднее квадратическое отклонение ряда минимальных расходов; C_v – коэффициент вариации выборочного минимального расхода; ε_{Cv} – относительная погрешность коэффициента вариации; W – зимний (XII, I–III) или летний (VI–VIII) объем стока; ΔQ – изменение минимального расхода, рассчитанное как Q_{II} – Q_I; ΔQ, % – изменение минимального расхода, рассчитанное по формуле ΔQ=(Q_{II}-Q_I)/Q_I·100 %; ΔW, % – изменение среднего за сезон объема стока, рассчитанное по формуле ΔW=(W_{II}-W_I)/W_I·100 %.

Note: *N is the number of observations; Q is the long-term mean minimum monthly water discharge over the period of observations; ε_Q is the relative error of long-term mean Q; σ is the standard deviation of minimum discharge time series; C_v is the variance coefficient of minimum discharge time series; ε_{Cv} is the relative error of C_v; W is the winter (XII, I–III) or summer (VI–VIII) water flow rate; ΔQ is the change of mean minimum discharge over the period of flow regulation in comparison with mean minimum discharge in natural conditions; ΔQ, % is the change of mean minimum discharge over the period of flow regulation in relation to mean minimum discharge in natural conditions; ΔW, % is the change of seasonal flow volume over the period of flow regulation in relation to mean seasonal flow volume in natural conditions.

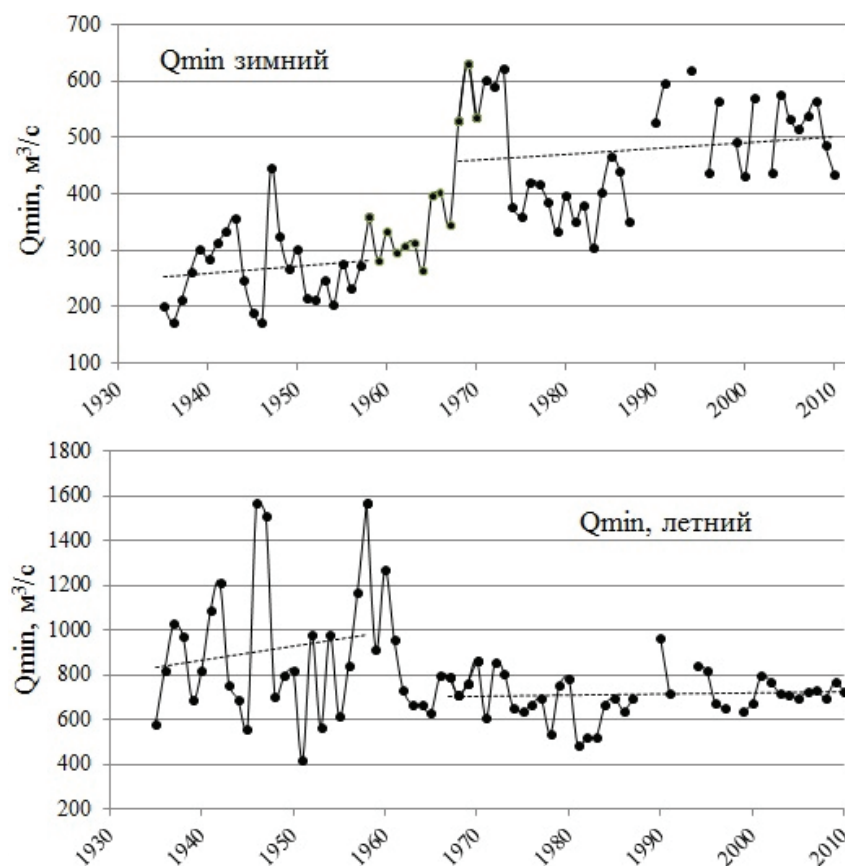


Рис. 2. Межгодовая динамика минимального среднемесячного стока р. Иртыш – п. Семиарка. Тенденции минимального стока, обозначенные пунктирной линией, статистически незначимы

Fig. 2. Inter-annual dynamics of minimum monthly mean water discharge of the Irtysh River at Semiyarka in winter and summer. Trends in the minimum flow indicated by a dotted line are statistically insignificant

(96 %), то их число в июле возросло (с 4 до 23 %) и они стали наблюдаться даже в июне, т. е. в месяцы, наиболее важные для вегетации растительности. Уменьшение расходов и падение уровней воды в реке приводят к более интенсивному осушению поймы.

Таблица 4. Частота наблюдения минимальных расходов в разные месяцы в естественных и зарегулированных условиях, %

Table 4. Frequency of minimum flow observations in different months under natural and regulated conditions, %

| Период/ Period | Q_{\min} зимний /in winter Q_{\min} летний /in summer | | | | | | | |
|---|--|-------------------|---------------------|---------------|--------------|--------------|------------------|--|
| | Декабрь December | Январь January | Февраль February | Март March | Июнь June | Июль July | Август August | |
| Естественные условия (1935–1959) Natural conditions | 3 | 14 | 33 | 50 | 0 | 4 | 96 | |
| Зарегулированные условия (1967–2010) Regulated conditions | 24 | 38 | 22 | 16 | 5 | 23 | 72 | |

Изменилась структура и минимального зимнего стока. Если в естественных условиях характерным признаком истощения подземного питания является минимум зимнего речного стока в конце зимы, то после ввода в строй каскада водохранилищ повторяемость минимальных зимних расходов увеличилась в 8 раз в декабре (с 3 до 24 %), а в марте перед началом половодья, наоборот, уменьшилась (с 50 до 16 %). В целом распределение повторяемости минимального расхода по месяцам года стало более выровненным.

В последние десятилетия в ряде публикаций приводятся материалы, подтверждающие наличие региональных тенденций увеличения уровней подземных вод и подземного стока в Сибири в связи глобальными климатическими изменениями (см. подробный обзор в [23, 24]). Возможно, в какой-то степени увеличение подземного стока происходит и в бассейне Иртыша, но значительность структурных и количественных изменений (увеличение зимнего стока на 70 %) и приуроченность наиболее существенного преобразования стока воды к датам начала его регулирования Верхне-Иртышским каскадом водохранилищ позволяет счи-

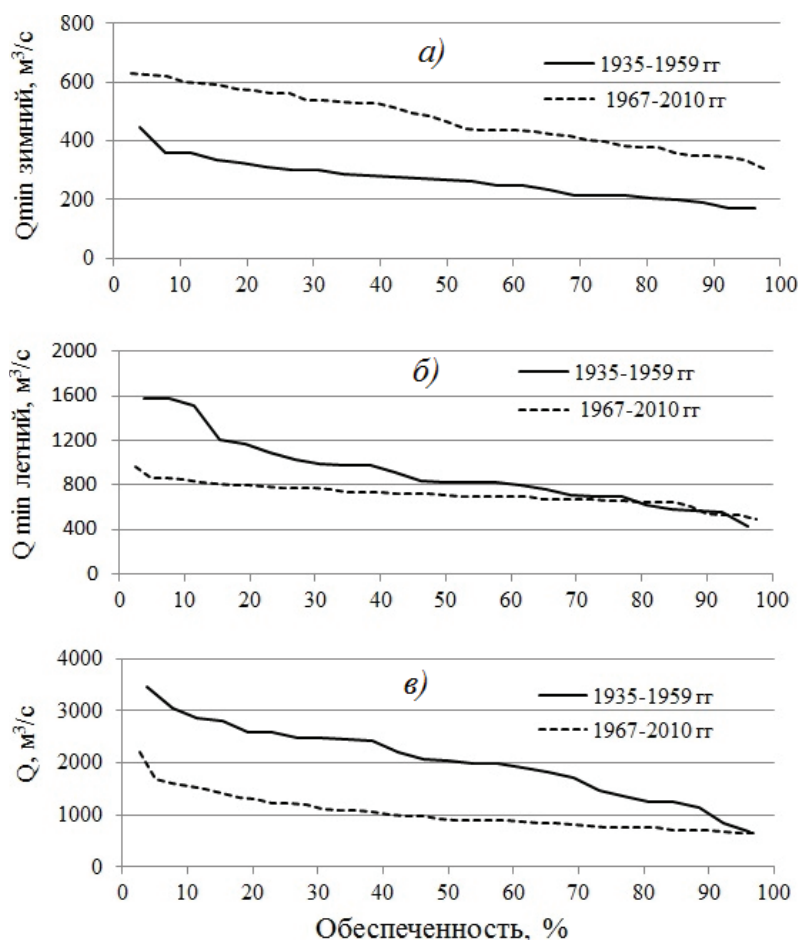


Рис. 3. Эмпирические кривые обеспеченности стока в естественных и зарегулированных условиях (р. Иртыш – п. Семиарка)

Fig. 3. Empirical probability graphs of water discharge exceedance under natural and regulated conditions (Irtysh River at Semiyarka)

тать последнее основной причиной наблюдаемых изменений стока.

На рис. 3 приведены для сравнения эмпирические кривые обеспеченности для разных гидрологических сезонов в естественных и зарегулированных условиях. Минимальный зимний расход любой обеспеченности увеличился относительно значений в естественных условиях: на 78 % для $Q_{\min 50\%}$ и на 92 % для $Q_{\min 95\%}$ (рис. 3, а).

С точки зрения проблем функционирования поймы более важным является анализ и оценка изменений минимального летнего стока. У летнего минимального стока взаиморасположение кривых обеспеченности по сравнению с зимним стоком носит противоположный характер, т. е. обеспеченные расходы в целом уменьшились. Только расходы 90–95 % обеспеченности остались на уровне естественного режима (рис. 3, б).

Расходы воды обеспеченностью 50 % ($Q_{\min \text{летн. } 50\%}$) уменьшились относительно стока в естественных условиях примерно на 22 %, расходы $Q_{\min \text{летн. } 25\%}$ – на 28 % (с 1076 до 770 м³/с). Для сравнения на рис. 3, в приведены кривые обеспеченности стока в июне. Расход обеспеченностью 25 % уменьшился в июне почти в 2 раза (52 %) с 2540 до 1230 м³/с.

Известно, что до постройки каскада водохранилищ воды Иртыша периодически затопляли пойму примерно через каждые 3–4 года. Поэтому, на наш взгляд, для восстановления и устойчивого поддержания естественных функций пойменных земель и предотвращения их чрезмерного осушения, исходя из периодичности затопления поймы в прошлом, необходимо ориентироваться на поддержа-

ние расходов воды летом на уровне 20–25 %, а не 95 % обеспеченности.

Выводы

1. Анализ изменений минимального стока р. Иртыш на равнинной части бассейна в пределах Павлодарской области Республики Казахстан позволяет утверждать, что в его структуре произошли значительные изменения:
 - минимальный летний расход уменьшился в среднем на 22 %;
 - объем летнего стока уменьшился на 38 %;
 - минимальный зимний расход увеличился на 78 %;
 - объем стока за декабрь–март увеличился на 70 %.
2. Существенные изменения имеются и в сроках наблюдения минимального летнего стока. Стали фиксироваться летние минимальные расходы в июне, чего в естественных условиях не наблюдалось. Увеличилась их повторяемость в июле (19 %), что негативно сказывается на экологическом состоянии поймы.
3. Распределение зимних минимальных расходов стало более выровненным по месяцам зимнего сезона, с наиболее высокой повторяемостью в январе (38 %).

Работа выполнена при поддержке проекта «Эразмус+» 561775-EPP-1-2015-1-DE-EPPKA2-CBHE-JP «Институциональное партнерство в целях устойчивости трансграничного водопользования: Россия и Казахстан».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Water resources of Kazakhstan in the new millennium: Report of the Republic of Kazakhstan // 5th World Water Forum. – Almaty: LEM Print house, 2004. – 124 p. URL: http://www.cawater-info.net/5wwf/national_report_kazakhstan_e.htm (дата обращения: 12.03.2016).
2. Логиновская А.Н. Изменчивость и антропогенная трансформация стока р. Бухтармы (Юго-Западный Алтай): автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – Барнаул, 2001. – 25 с.
3. Кошелева Е.Д., Зиновьев А.Т. Влияние трансграничных факторов на водный режим Иртыша // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: труды Всеросс. науч. конф. с межд. участием (20–24 августа 2012, г. Барнаул). – Барнаул, 2012. – Т. 3. – С. 212–262.
4. Естественно-исторические предпосылки для разработки гидрологической модели Иртыша / А.И. Кузьмин, В.Н. Русаков, И.В. Карнаевич, Ж.А. Тусупбеков // Проблемы управления и рационального использования водных ресурсов бассейна реки Иртыш: матер. межд. научно-практ. конф. – Омск, 2003. – С. 120–122.
5. Современное состояние водных ресурсов бассейна р. Ертыс / М.А. Бейсембаева, В.А. Земцов, Л.И. Дубровская, К.У. Базарбеков // Современные проблемы географической науки: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию КазНУ им. аль-Фараби. – Алма-Аты, 2014. – С. 220–222.
6. Бейсембаева М.А., Дубровская Л.И. Оценка многолетней динамики водного стока Верхнего Иртыша в целях устойчивого водопользования // Вестник Томского государственного университета. – 2014. – № 379. – С. 189–195.
7. The issues of water resources use in transboundary rivers of the Republic of Kazakhstan, the People's republic of China and the Russian Federation // Second meeting of the Implementation Committee of the UNECE Water Convention (Geneva, 12 December 2013). URL: http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/water/meetings/Implementation_Committee/2nd_meeting/Analytical_note_transboundary_issues_Irtysh_Ili.pdf (дата обращения: 12.03.2016).
8. Duskaev K.K., Schenberger I.V. Evaluation of the Potential Environmental Consequences of Water Extraction from the River of Black Irtysh in the Black Irtysh-Karamai Canal in the People's Republic of China // Vestnik of Kazakh State University, Geography Series. 1999. – № 1. – P. 68–73.
9. Дуйсейбаева К.Д., Габдолла О.Ж. Проблемы совместного использования водных ресурсов стран центральной Азии // Современные проблемы географической науки: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию КазНУ им. аль-Фараби. – Алма-Аты, 2014. – С. 56–59.
10. Рябцев А.Д. Угрозы водной безопасности в Республике Казахстан в трансграничном контексте и возможные пути их устранения. URL: http://www.icwc-aral.uz/workshop_march08/pdf/ryabtsev_ru.pdf (дата обращения: 10.03.2016).

11. Dynamics of the Irtysh River Floodplain Hydrology and Vegetation in the Pavlodar Region of the Republic of Kazakhstan / M.A. Beysenbayeva, V.A. Zemtsov, V.A. Kamkin, K.U. Bazarbekov // Riparian Zones: Characteristics, Management Practices and Ecological Impacts. Ch. 9 / Ed. by O.S. Pokrovsky. – Hauppauge NY, USA: Nova Science Publishers, 2016. – P. 211–230.
12. Исследование реки Иртыш и поймы с целью оценки влияния антропогенной деятельности, в том числе зарегулирования стока Верхне-Иртышского каскада водохранилищ, и разработка мероприятий по рациональному использованию и охране водных ресурсов реки Иртыш в период весенних природоохранных попусков. Отчет ТОО «Научно-производственное предприятие «Биосфера»». – Павлодар, 2011. – 418 с.
13. Стоящева Н.В., Рыбкина И.Д. Оценка антропогенной нагрузки на водосборную территорию и водные объекты трансграничного бассейна р. Иртыш // Ползуновский вестник. – 2011. – № 4–2. – С. 98–102.
14. Отчет по мониторингу природоохранного попуска воды в пойму р. Иртыш за 2012 год. – Павлодар, 2012. – 163 с.
15. Романова Ю.А. Водохозяйственный комплекс бассейна реки Иртыш в условиях перераспределения речного стока выше трансграничных створов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2013. – 25 с.
16. Hydrological changes of the Irtysh River and the possible causes / F. Huang, Z. Xia, F. Li, L. Guo, F. Yang // Water resources management. – 2012. – V. 26. – № 11. – P. 3195–3208.
17. Effects of reservoirs on seasonal discharge of Irtysh River measured by Lepage test / F. Huang, Z. Xia, F. Li, L. Guo, F. Yang // Water Science and Engineering. – 2014. – V. 7. – № 4. – P. 363–372.
18. Hrkal Z., Gadalia A., Rigaudiere P. Will the river Irtysh survive the year 2030? Impact of long-term unsuitable land use and water management of the upper stretch of the river catchment (North Kazakhstan) // Environmental Geology. – 2006. – V. 50. – № 5. – P. 717–723.
19. Проблема качества воды реки Иртыш в пределах Казахстана / М.А. Бейсембаева, В.А. Земцов, К.У. Базарбеков, О.Б. Мазбаев // Современные проблемы географии и геологии: матер. III Международной научно-практической конференции с элементами школы-семинара для студентов, аспирантов и молодых ученых / под ред. Н.С. Евсеевой. – Томск, 2014. – С. 513–518.
20. Sarsembekov T.T., Kozhakov A.E. Management of Water Resources and Quality of Water of Cross-border Rivers. – Almaty: Atamura, 2003. – 432 p.
21. СП 33–101–2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 72 с.
22. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.
23. Hydrological changes: historical analysis, contemporary status, and future projections / A.I. Shiklomanov, R.B. Lammers, D.P. Lettenmaier, Yu.M. Polischuk, O.G. Savichev, L.C. Smith, A.V. Chernokulsky // Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences / Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. – Dordrecht: Springer Environmental Science and Engineering, Springer, 2013. – P. 111–154.
24. Zemtsov V.A., Savichev O.G. Resources, regime and quality of surface waters in the Ob River basin: history, current state and problems of research // International Journal of Environmental Studies. – 2015. – № 3. – P. 386–396. DOI: 10.1080/00207233.2015.1019299.

Поступила 14.03.2016 г.

Информация об авторах

Бейсембаева М.А., аспирант кафедры гидрологии Национального исследовательского Томского государственного университета.

Дубровская Л.И., кандидат физико-математических наук, доцент кафедры гидрологии Национального исследовательского Томского государственного университета.

Земцов В.А., доктор географических наук, заведующий кафедрой гидрологии Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDC 556.16

MINIMUM FLOW OF THE UPPER IRTYSH RIVER IN THE BASIN FLAT PART IN THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN UNDER ANTHROPOGENIC IMPACT

Manira A. Beysembaeva¹,

manira_ter@mail.ru

Larissa I. Dubrovskaya¹,

dubrli@sibmail.com

Valery A. Zemtsov¹,

Zemtsov_v@mail.ru

¹ National Research Tomsk State University,
36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

In Russian hydropolitics, the Irtysh as the transboundary river is the subject of different level negotiations on the issue of shared use of water resources with the Republic of Kazakhstan and China. In the result of putting in operation of the Upper-Irtysh multireservoir cascade the deterioration of environmental condition, particularly, in a floodplain which has major significance as the source of feed supplies for agricultural production, is observed in the flat part of the Irtysh basin. Therefore, it is important to analyze current condition and changes of different characteristics of hydrological regime of the river, and specifically the minimum flow.

The aim of the research is to indicate the changes of water flow regime and minimum water flow rates in the Irtysh River in the flat part of its basin (in the Republic of Kazakhstan).

Research methods. The authors have applied hydrological and geographical approach to analyze standard observational data on the Irtysh flow in the cross section at Semiyarka village – a water level gauge station located directly downstream the multireservoir cascade during two time periods: in natural (1935–1959) and regulated (1967–2010) conditions. Statistical methods were applied: testing homogeneity of the means and variances using the Student t-test and the Fisher F-test, and trend significance using parametric and non-parametric criteria.

Results. It is shown that water flow regulation by the Upper-Irtysh multireservoir cascade resulted in significant decrease of minimum summer monthly river discharge (by 22 %), increase of minimum winter river discharge (by 78 %), redistribution of the Irtysh flow between summer (decrease by 38 %) and winter (increase by 70 %) seasons, and, as a consequence, in deterioration of hydrological and environmental condition of the floodplain. Corresponding flow characteristics under natural conditions were used as the base for comparison.

Key words:

Minimum water flow, transboundary Irtysh river, flow regulation, cascade of reservoirs, intra-annual redistribution of flow.

The research was financial supported by the project "Erasmus+" 561775-EPP-1-2015-1-DE-EPPKA2-CBHE-JP "Institutional partnership for sustainable usage of water resources: Russia-Kazakhstan".

REFERENCES

1. Water resources of Kazakhstan in the new millennium: Report of the Republic of Kazakhstan. *5th World Water Forum*. Almaty, LEM Print house, 2004. 124 p. Available at: http://www.cawater-info.net/5wwf/national_report_kazakhstan_e.htm (accessed: 12 03.2016).
2. Loginovskaya A.N. *Izmenchivost i antropogennaya transformatsiya stoka r. Bukhtarma (Yugo-Zapadnyy Altay)*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Variability and anthropogenic transformation of the Bukhtarma River runoff. Cand. Diss. Abstract]. Barnaul, 2001. 25 p.
3. Kosheleva E.D., Zinovev A.T. Vliyaniye transgranichnykh faktorov na vodnyy rezhim Irtysha [Influence of transboundary factors on water mode of the Irtysh river]. *Vodnye i ekologicheskiye problemy Sibiri i Tsentralnoi Azii: Trudy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Water and environmental problems of Siberia and Central Asia. Proc. of the All-Russian scientific conference]. Barnaul, 2012. Vol. 3, pp. 212–262.
4. Kuzmin A.I., Rusakov V.N., Karnatsevich I.V., Tusupbekov Zh.A. Estestvenno-istoricheskiye predposylki dlya razrabotki gidrologicheskoy modeli Irtysha [Natural-historical preconditions for development of hydrological model of the Irtysh]. *Problemy upravleniya i ratsionalnogo ispolzovaniya vodnykh resursov basseyna reki Irtysh. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems of management and rational use of water resources of the Irtysh River Basin. Proc. of Int. Scient. conf]. Omsk, 2003. pp. 120–122.
5. Beysembaeva M.A., Zemtsov V.A., Dubrovskaya L.I., Bazarbekov K.U. Sovremennoe sostoyaniye vodnykh resursov basseina r. Ertis [The current state of the Irtysh water basin]. *Sovremennyye problemy geograficheskoy nauki. Materialy mezhdunarodnoy konferentsii* [Current problems of geography. International scientific-practical conference, devoted to the 80th anniversary of the Kazakh National University named after Al-Farabi]. Almaty, 2014. pp. 220–222.
6. Beysembaeva M.A., Dubrovskaya L.I. Estimation of perennial change in water runoff of the Upper Irtysh for stable water consumption. *Bulletin of the Tomsk State University*, 2014, vol. 379, pp. 189–195. In Rus.
7. *The issues of water resources use in transboundary rivers of the Republic of Kazakhstan, the People's republic of China and the Russian Federation. Second meeting of the Implementation Committee of the UNECE Water Convention* (Geneva, 12 December 2013). Available at: http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/water/meetings/Implementation_Committee/2nd_meeting/Analytical_note_transboundary_issues_Irtysh_Ili.pdf (accessed: 12 March 2016).

8. Duskaev K.K., Schenberger I.V. Evaluation of the Potential Environmental Consequences of Water Extraction from the River of Black Irtysh in the Black Irtysh-Karamai Canal in the People's Republic of China. *Vestnik of Kazakh State University, Geography Series*, 1999, no. 1, pp. 68–73.
9. Duyseybaeva K.D., Gabdolla O.Zh. Problemy sovместnogo ispolzovaniya vodnykh resursov stran Tsentralnoy Azii [Problems of shared use of water resources in Central Asia]. *Sovremennye problemy geograficheskoy nauki. Materialy mezhdunarodnoy konferentsii* [Current problems of geography. International scientific-practical conference, devoted to the 80th anniversary of the Kazakh National University named after Al-Farabi]. Almaty, 2014. pp. 56–59.
10. Ryabtsev A.D. *Ugrozy vodnoy bezopasnosti v respublike Kazakhstan v transgranichnom kontekste i vozmozhnye puti ikh ustraneniya* [Threats to Water Security in the Republic of Kazakhstan in a transboundary context and possible ways to remove them]. Available at: http://www.icwc-aral.uz/workshop_march08/pdf/ryabtsev_ru.pdf (accessed 12 March 2016).
11. Beysenbayeva M.A., Zemtsov V.A., Kamkin V.A., Bazarbekov K.U. Dynamics of the Irtysh River Floodplain Hydrology and Vegetation in the Pavlodar Region of the Republic of Kazakhstan. *Riparian Zones: Characteristics, Management Practices and Ecological Impacts*. Ch. 9. Ed. by O.S. Pokrovsky. Hauppauge NY, USA, Nova Science Publishers, 2016. pp. 211–230.
12. Issledovanie reki Irtyshi i poymy s tselyu otsenki vliyaniya antropogennoy deyatel'nosti, v tom chisel zaregulirovaniya stoka Verkhne-Irtyshskogo kaskada vodokhranilishch, i razrabotka meropriyatiy po ratsionalnomu ispolzovaniyu i okhrane vodnykh resursov reki Irtysh v period vesennikh prirodokhrannykh popuskov [Investigation of the Irtysh River and its floodplain for assessing the impact of human activities, including the regulation of the river flow by the Upper-Irtysh cascade of reservoirs and the development of measures for rational use and protection of water resources of the Irtysh River during spring environmental releases]. *Otchet TOO «Nauchno-proizvodstvennoe predpriyatie «Biosfera»* [The report «Research and Production Enterprise «Biosphere»]. Pavlodar, 2011. 418 p.
13. Stoyashcheva N.V., Rybkina I.D. *Otsenka antropogennoy nagruzki na vodosbornuyu territoriyu i vodnye obekty transgranichnogo basseyna r. Irtysh* [Assessment of anthropogenic impact on the catchment area and water bodies of the transboundary basin of the Irtysh river]. *Polzunovskiy vestnik*, 2011, no. 4–2, pp. 98–102.
14. *Otchet po monitoringu prirodokhrannogo popuska vody v poymu r. Irtysh za 2012 god* [Report on the monitoring of environmental water releases in the floodplain of the Irtysh for 2012]. Pavlodar, 2012. 163 p.
15. Romanova Yu.A. *Vodokhozyaystvenny kompleks basseyna reki Irtysh v usloviyakh pereraspredeleniya rechnogo stoka vyshе transgranichnykh stvorov*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Water complex of the Irtysh River Basin in terms of river flow redistribution upstream the transboundary cross section. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2013. 25 p.
16. Huang F., Xia Z., Li F., Guo L., Yang F. Hydrological changes of the Irtysh River and the possible causes. *Water resources management*, 2012, vol. 26, no. 11, pp. 3195–3208.
17. Huang F., Xia Z., Li F., Guo L., Yang F. Effects of reservoirs on seasonal discharge of Irtysh River measured by Lepage test. *Water Science and Engineering*, 2014, vol. 7, no. 4, pp. 363–372.
18. Hrkal Z., Gadalia A., Rigaudiere P. Will the river Irtysh survive the year 2030? Impact of long-term unsuitable land use and water management of the upper stretch of the river catchment (North Kazakhstan). *Environmental Geology*, 2006, vol. 50, no. 5, pp. 717–723.
19. Beysenbaeva M.A., Zemtsov V.A., Bazarbekov K.U., Mazbaev O.B. Problema kachestva vody reki Irtysh v predelakh Kazakhstana [The problem of water quality of the river Irtysh within Kazakhstan]. *Sovremennye problemy geografii i geologii. Materialy III mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Current Problems of Geography and Geology. Proc. of the III International scientific-practical conference]. Tomsk, 2014. pp. 513–518.
20. Sarsembekov T.T., Kozhakov A.E. *Management of Water Resources and Quality of Water of Cross-border Rivers*. Almaty, Atamura, 2003. 432 p.
21. *SP 33–101–2003. Svod pravil po proektirovaniyu i stroitelstvu. Opredelenie osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Code of practice for design and construction. Identification of the main hydrological characteristics]. Moscow, Russian State Committee for Construction, 2004. 72 p.
22. Kobzar A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika* [Applied mathematical statistics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 816 p.
23. Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Lettenmaier D.P., Polischuk Yu.M., Savichev O.G., Smith L.C., Chernokulsky A.V. Hydrological changes: historical analysis, contemporary status, and future projections. *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*. Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. Dordrecht, Springer Environmental Science and Engineering, 2013. pp. 111–154.
24. Zemtsov V.A., Savichev O.G. Resources, regime and quality of surface waters in the Ob River basin: history, current state and problems of research. *International Journal of Environmental Studies*, 2015, no. 3, pp. 386–396. DOI: 10.1080/00207233.2015.1019299.

Received: 14 March 2016.

Information about the authors

Manira A. Beysenbaeva, postgraduate student, National Research Tomsk State University.

Larissa I. Dubrovskaya, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk State University.

Valery A. Zemtsov, Dr. Sc., Head of the Department of Hydrology, National Research Tomsk State University.

УДК 553.98:528.8(571.51)

НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО СТРУКТУРЕ РАЙОНА ВАНКОРСКОГО ГАЗОНЕФТЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Житков Владимир Георгиевич¹,
vlgitkov@tpu.ru

Поцелуев Анатолий Алексеевич¹,
poan@tpu.ru

Ананьев Юрий Сергеевич¹,
ananievus@tpu.ru

Кринин Владимир Александрович²,
Vkrinin@sfu-kras.ru

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

² Сибирский федеральный университет,
Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 86, стр. 2.

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения эффективности прогнозных работ на основе структурно-тектонических факторов локализации крупных нефтегазовых объектов и последующим применением выявленных закономерностей на новых площадях.

Цель работы: установить структурно-тектонические обстановки, определяющие локализацию и внутреннее строение нефтегазовых полей и месторождений ванкорского типа, на основе космоструктурной схемы территории.

Методы исследования: обработка, дешифрирование и анализ материалов мультиспектральных космических съемок среднего и высокого разрешения с использованием алгоритмов направленной фильтрации, многомерной статистики и алгебры карт.

Результаты. По материалам мультиспектральных космических систем Landsat ETM+, TERRA ASTER и радиолокационной съемки ERS-ENVISAT изучены структуры Пуртазовской нефтегазоносной области, примыкающие к Ванкорскому газонефтяному месторождению, и площадь самого Ванкорского месторождения. Установлено широкое развитие и последовательность формирования разрывных тектонических нарушений различной ориентировки, кольцевых, дуговых и площадных структур, контролирующих положение известных нефтегазовых месторождений. Совокупность полученных данных позволяет сформулировать комплекс критериев по локализации новых перспективных площадей. Установлено, что все известные месторождения нефти и газа на данной территории залегают в пределах зон флюидомиграции, которые приурочены к концентрическим кольцевым структурам. Все месторождения залегают в пределах линейной зоны, отвечающей Худосейскому рифту или его сателлитным разломам. Размещение месторождений в пределах выше обозначенных структур контролируется поздними нарушениями северо-восточного прогибания. Совокупность полученных данных о приуроченности известных месторождений к выделенным структурам позволяет сформулировать комплекс критериев по локализации новых перспективных площадей в изученном районе.

Ключевые слова:

Красноярский край, Ванкорская нефтегазоносная площадь, космоматериалы, линейные структуры, кольцевые структуры, зоны флюидомиграции.

Введение

Использование материалов современных космических съемок (КС) позволяет получить информацию о геоструктурных особенностях исследуемых площадей, выработать критерии локализации перспективных участков для постановки детальных работ. Этому способствует ряд явных преимуществ материалов КС перед другими методами наземных и аэроисследований. В первую очередь это обзорность, равноазимутальная информативность, отсутствие недостатков выборочных профильных наблюдений, экспрессность, дешевизна, экологичность [1–3]. Их применение весьма актуально как на новых малоизученных площадях, так и в известных нефтегазоносных районах, детально изученных наземными методами.

Объектом исследований является территория нефтегазоперспективных земель, примыкающая к Ванкорскому месторождению, расположенная в Туруханском районе Красноярского края, на левобережье Большой Хеты [4]. В административном отношении площадь работ охватывает Туруханский район Красноярского края, крайнюю восточную часть Ямало-Ненецкого и юго-западную часть Таймырского АО. Группа месторождений, к которой относят Ванкорское, Лодочное, Тагульское, Сузунское месторождения, в структурно-тектоническом плане входят в состав Большехетской структурной террасы. Прилегающие к Ванкорскому месторождению Западно-Лодочная, Ичемминская, Талая, Ниричарская, Хикиглинская, Ячиндинская структуры находятся в стадии исследования.

Геологическое строение и нефтегазоносность

В тектоническом отношении рассматриваемая территория находится на стыке Большехетской структурной террасы и Пендомаяхской впадины, осложняющих северо-восточный борт Надым-Тазовской синеклизы. Геологический разрез, перспективный в нефтегазоносном отношении, представлен отложениями катаплатформенного осадочного чехла. Основной этаж нефтегазоносности образован нижнехетским, яковлевским, долганским продуктивными горизонтами нижнего и верхнего мела. Меньшие перспективы нефтегазоносности связаны с сиговским горизонтом верхней и малышевским горизонтом средней юры.

Промышленные запасы нефти и газа рассматриваемой территории сконцентрированы исключительно в ловушках структурного типа, в редких случаях некоторые залежи имеют литологическое ограничение за счет замещения песчаников пелитовыми разностями. Все крупные локальные структурные ловушки (Сузунская, Ванкорская, Лодочная, Тагульская) приурочены к структурам первого порядка – Сузунскому и Лодочному валам [4–9]. Мелкие поднятия, как правило, осложняют восточный борт Пендомаяхской впадины и отражаются в меловом структурно-формационном комплексе (рис. 1).

Методика обработки материалов

В работе использованы материалы мультиспектральных космических съемок Aster и Landsat ETM+. Дополнительно по данным радиолокационной съемки радаром ERS-ENVISAT была создана цифровая модель рельефа.

Обработка, дешифрирование, анализ космоматериалов и моделирование геологических и рудных систем выполнены в соответствии с методическими рекомендациями и подходами [1–3, 10–26]. Принципиальная схема работ состояла:

- из формирования массива исходных данных;
- обработки и дешифрирования исходных растровых изображений с использованием алгоритмов классификации, процедур улучшения, комплекса методов фильтрации и передискретизации изображения;
- создания и обработки синтезированного изображения мультиспектральных снимков;
- создания производных растровых изображений с использованием «алгебры карт»;
- корреляционного анализа синтезированных изображений;
- обработки и анализа цифровой модели рельефа;
- совместного анализа растровых изображений и цифровой модели рельефа, дешифрирования с использованием 3D-визуализации и анаглифических (стерео) изображений;

В работе использовались синтезированные изображения с различной комбинацией каналов, что позволило распознавать слабоаномальные объекты как линейной, так и дуговой и кольцевой морфоло-

гии, а также элементы геологического свойства – разрывные нарушения, флюидопроводящие системы и элементы тектонических деформаций (рис. 2).

В итоге анализу и интерпретации в процессе исследований было подвергнуто более 300 изображений.

Результаты и их обсуждение

Исследования показывают, что на Большехетской структурной террасе в материалах космических съемок проявлены структуры трех типов: линейной, кольцевой (дуговой) морфологии и площадные.

Среди линейных преобладают структуры субмеридионального, северо-восточного, субширотного простирания, которые соответствуют разрывным нарушениям различного уровня заложения. Субмеридиональные разломы являются наиболее ранними образованиями, определяют положение главных геотектонических структур и, по-видимому, проникают в верхнюю мантию. К этому типу нарушений относится «Главная» линеаментная зона, по своему местоположению и ориентировке соответствующая Худосейскому рифту. Зона представлена серией субпараллельных линеаментов различной протяженности и имеет ширину выхода на дневную поверхность от 25 до 35 км.

Установлено сателлитное тектоническое нарушение, по-видимому, сингенетичное «Главной» зоне. Оно расположено к западу, имеет субмеридиональное простирание, на юге примыкает к «Главной» зоне, а к северу отклоняется от нее на расстояние до 20 км. В пределах «Главной» зоны отчетливо выделяется крупное тектоническое нарушение, проходящее через западный фланг Ванкорского месторождения.

Субширотные и северо-восточные структуры являются более поздними. Их кинематика устанавливается по смещению границ площадных структур, выявленных на территории исследований и описанных ниже. Амплитуда смещений по разломам северо-восточного простирания достигает 14,5 км. Так, южный фланг Ванкорского месторождения срезан нарушением северо-восточного направления (рис. 3). Возможно, находящаяся южнее перспективная структура Талая является реликтом срезанной части залежи Ванкорского месторождения. Субширотные разрывы характеризуются смещениями до 4 км. Структуры северо-западного простирания смещают границы более ранних образований до 7 км.

Выявленные кольцевые и дуговые структуры варьируют от 1 до 83 км по радиусу (рис. 3, 4). Наиболее крупными кольцевыми структурами района являются Ванкорская – радиус 83 км и Чировая – радиус 58 км (рис. 3). По-существу, вся территория исследований попадает в пределы Ванкорского кольца. Чировая структура располагается южнее и включает одноименное локальное поднятие в своей центральной части.

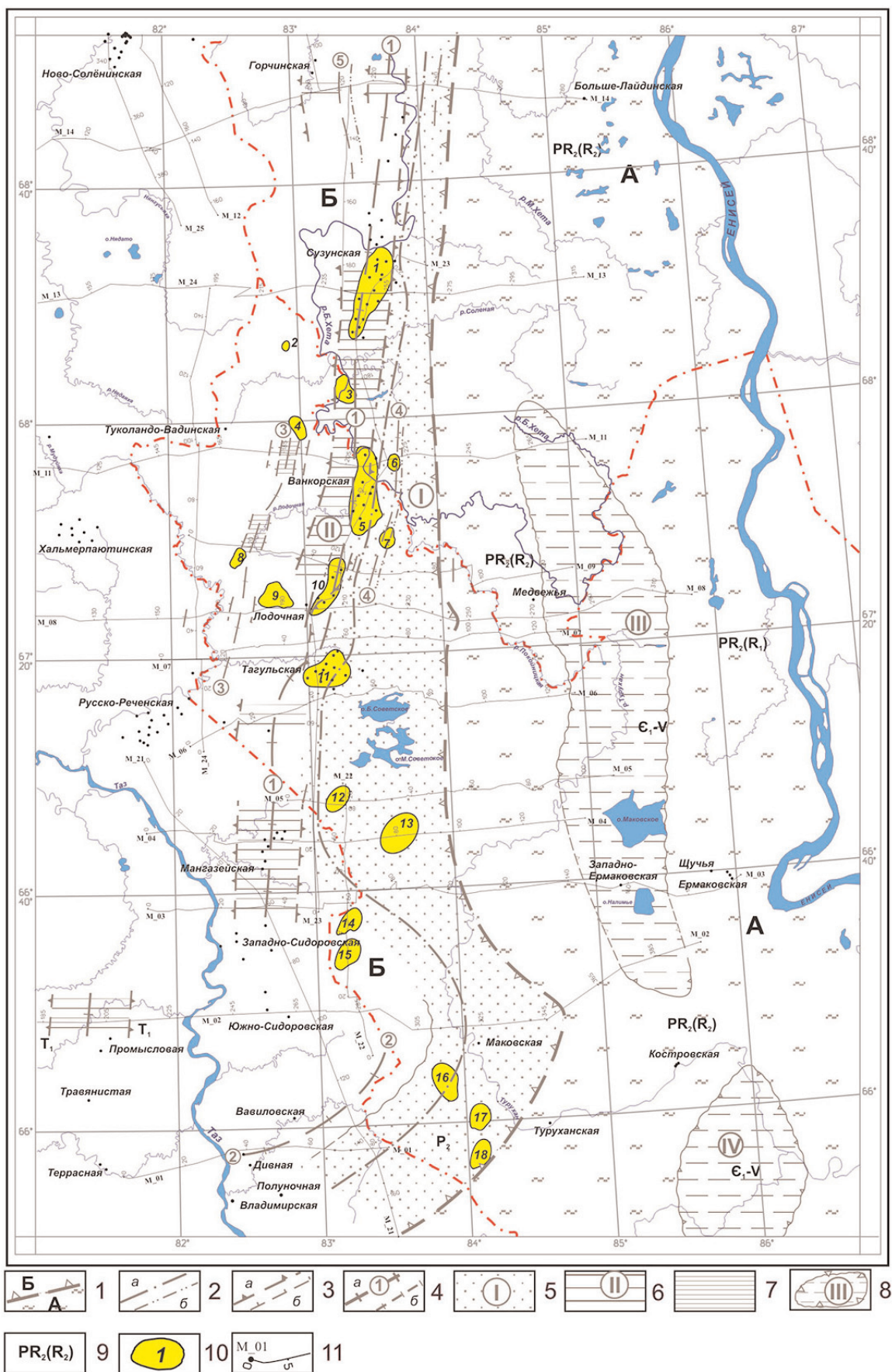


Рис. 1. Тектоническая схема района Большехетской структурной террасы по данным [2]: 1) участок приподнятого положения докембрийского складчатого фундамента (граница Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты): А) Игаро-Туруханский выступ, Б) Худосейский грабен-рифт; 2) оси синклиналиев: а) первого порядка (грабены), б) второго порядка (синклиналильные зоны); 3) границы антиклинорий: а) первого порядка (горсты), б) второго порядка (горстоподобные блоки); 4) оси антиклинорий: а) первого порядка: 1 – Большехетско-Тагульского горста, 2 – Парусового горста (выступа); б) второго порядка: 3 – Хикигли-Верхнелодочного горстоподобного блока, 4 – Осетровой антиклинальной зоны, 5 – Пендомаяхского горстоподобного блока; 5–7 – площадь развития: 5) Приенисейского грабена (I); 6) Большехетско-Тагульского горста (II); 7) Хикигли-Верхнелодочного горстоподобного блока; 8) венд-палеозойские впадины: III – Маковская, IV – Нижнебайхская; 9) предполагаемый возраст отложений, слагающих тектонические структуры; 10) локальные поднятия в юрско-меловом чехле: 1 – Сузунское, 2 – Восточно-Чарское, 3 – Ячиндинское, 4 – Хикиглинское, 5 – Ванкорское, 6 – Ниричарское, 7 – Талое, 8 – Западно-Лодочное, 9 – Ичемминское, 10 – Лодочное, 11 – Тагульское, 12 – Чировое, 13 – Советское, 14 – Северо-Полярное, 15 – Полярное, 16 – Глухариное, 17 – Туруханское, 18 – Лебяжье; 11) региональные сейсмические маршруты

Fig. 1. Tectonic scheme of Bolshekhetsky structural terrace by [2]. 1) fragment of uplift location for Precambrian folded basement (margin of Siberian platform and Western Siberian plate): A) Igaro-Turukhan promontory, B) Khudoseysky graben-rift; 2) axes of synclines: a) the first order (grabens), b) the second order (syncline zones); 3) Borders of anticlines: a) the first order (gorsts), b) the second order (gorst shaped blocks); 4) Axes of anticlines: a) the first order: 1 – Bolshekhetsky-Tagulsky gorst, 2 – Parusovsky gorst; b) the second order: 3 – Khikigly-Verkhnelodochny gorst shaped block, 4 – Osetrovaya anticline zone, 5 – Pendomayakhsky gorst shaped block; 5–7 area of distribution: 5) Prienisey graben (I); 6) Bolshekhetsky-Tagulsky gorst (II); 7) Khikigly-Verkhnelodochny gorst shaped block; 8) Vend-Paleozoic depression: III – Makovskaya, IV – Nizhnebaikhsкая; 9) Supposed age of rocks forming tectonic structures; 10) Local uplift blocks in Jurassic-Cretaceous cover: 1 – Suzunsky, 2 – Vostochno-Charsky, 3 – Yachindinsky, 4 – Khikiglinsky, 5 – Vankorsky, 6 – Niricharsky, 7 – Taly, 8 – Zapodno-Lodochny, 9 – Ichemminsky, 10 – Lodochny, 11 – Tagulsky, 12 – Chirovy, 13 – Sovetsky, 14 – Severo-Polyarny, 15 – Polyarny, 16 – Glukharinny, 17 – Turukhansky, 18 – Lebyazhye; 11) Regional seismic profiles

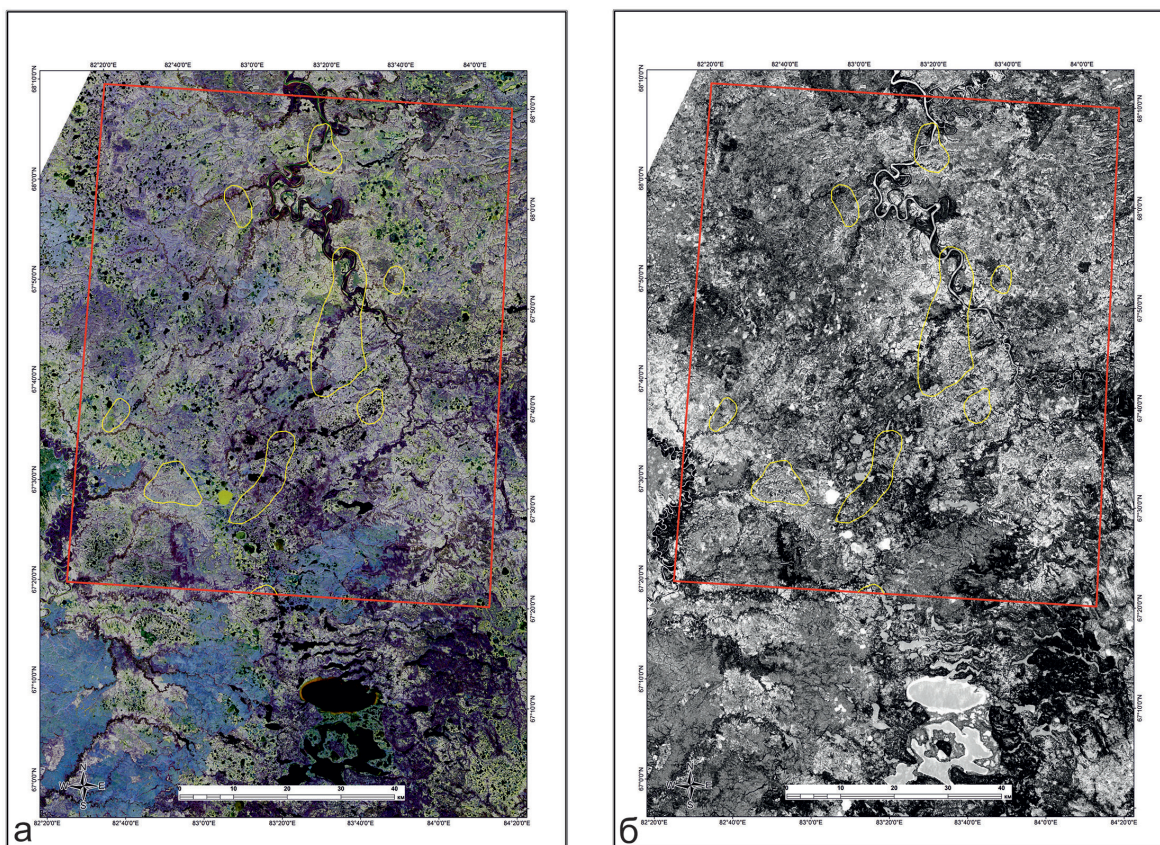


Рис. 2. Компоненты дистанционной основы: а) композит по материалам космической съемки Landsat ETM+ (комбинация спектральных диапазонов 0,75–0,90; 0,63–0,69; 0,45–0,52 мкм); б) обработка по методу главных компонент (третья компонента). Явственно видны зоны флюидомиграции северо-западного простирания, нарушенные и смещенные разломами северо-восточной ориентировки. Красный контур – границы площади исследований; желтые контуры – нефтегазовые месторождения и перспективные структуры

Fig. 2. Components of remote groundwork: a) composite by Landsat ETM+ system (combination of spectral channels 0,75–0,90; 0,63–0,69; 0,45–0,52 μm); b) processing by the principal component method (the third component). The north-west trending zones of fluidomigration interrupted and shifted by north-west oriented faults are clearly visible. The red contour is the border of the research area; yellow contours are oil-gas deposits and promising structures

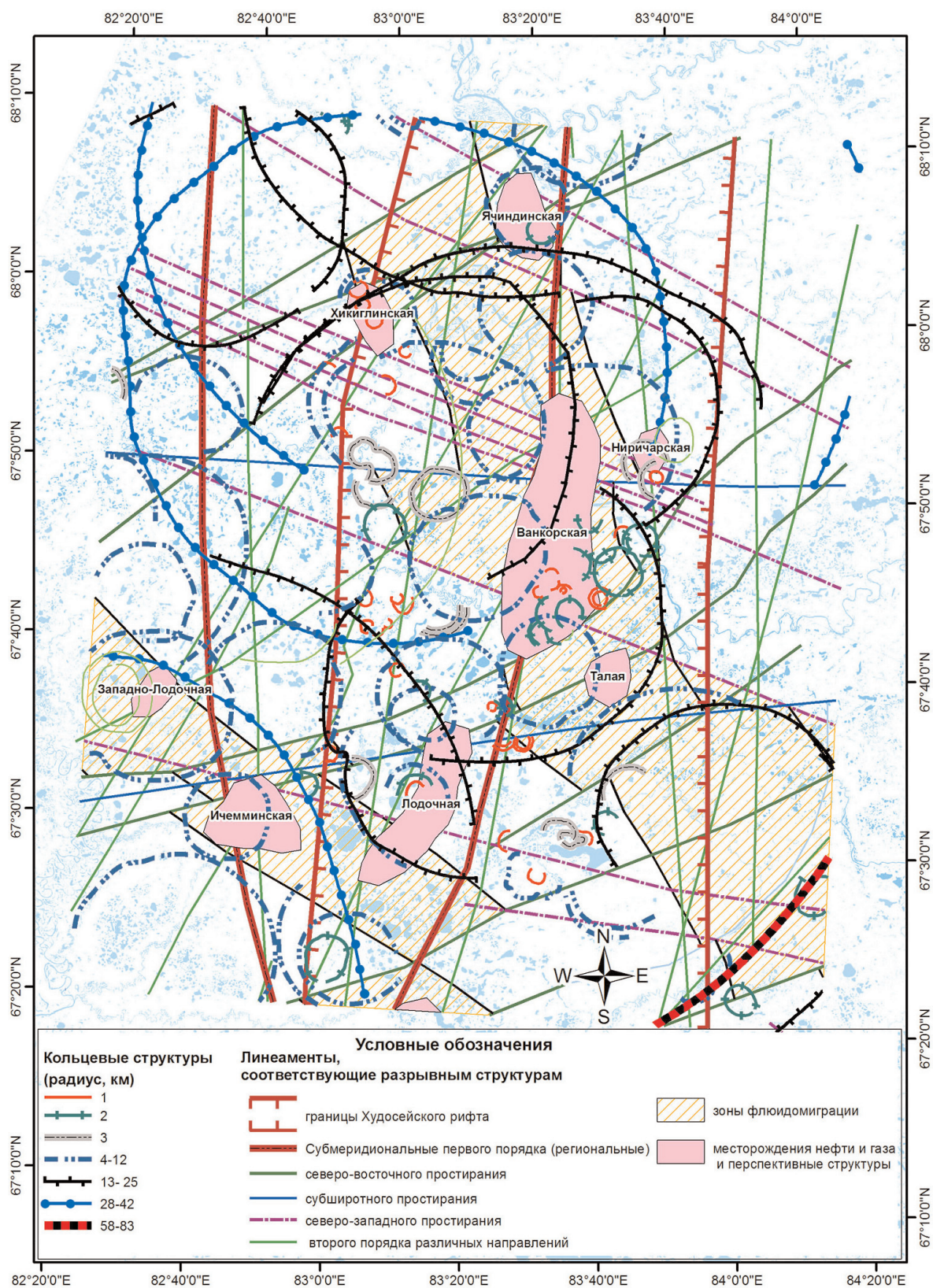


Рис. 3. Обзорная космоструктурная схема района Большехетской структурной террасы. Условные обозначения – рис. 4
Fig. 3. Small scale space structural scheme of Bolshekhetsky structural terrace area. Legend is on fig. 4.

Центр Ванкорской кольцевой структуры, так же как и кольцевых и дуговых структур более высоких порядков, контролируется «Главной» линейной структурой субмеридионального простирания и ее сателлитными разломами того же направления. Центральная область Ванкорской структуры, которая может рассматриваться в качестве «центра возмущения», располагается в непосредственной близости от Ванкорского месторождения.

Центры кольцевых структур второго порядка с радиусами от 28 до 42 км также лежат в пределах «Главной» зоны со смещением к западу от ее центральной части. Одна из них имеет центр в районе Хикиглинской структуры, центр другой соответствует Ячиндинскому локальному поднятию. Эти структуры характеризуют более слабые «возмущения» и могут содержать, соответственно, более мелкие залежи углеводородов по сравнению с Ванкорским.

Отмечается закономерное расположение кольцевых структур радиусом 7–9 км вдоль субмеридионального шва, проходящего в центральной части «Главной» зоны. При этом центры данных структур, как правило, смещены к западу относительно самого линейного элемента на расстояние 3–7 км. Подобное положение занимают структуры этого ранга и по отношению к западному сателлитному шву «Главной» линейной зоны. Часть этих кольцевых структур вмещает известные месторождения углеводородов и ряд перспективных площадей.

К площадным структурам относятся Северо-Восточная и Юго-Западная зоны «флюидомиграции» (рис. 3, 4). По мнению авторов, формирование этих структур обусловлено проявлением метасоматических процессов, повлиявших на физико-химические свойства пород. Это отразилось в спектрметрических характеристиках площадных структур. Зоны имеют северо-западное простирание.

Северо-Восточная зона в районе Ванкорского месторождения разворачивается в субмеридиональном направлении. Видимая мощность Северо-Восточной зоны колеблется от 15,8 до 24,6 км, Юго-Западной – от 9,5 до 13,7 км.

Обе зоны имеют блоковое строение за счет смещений, вызванных поздними нарушениями северо-восточного и субширотного простирания. Амплитуда смещений границ зон колеблется от 1,5 до 17,5 км по нарушениям северо-восточного простирания и от 1,5 до 9,4 км по нарушениям субширотного и северо-западного направления.

В целом по характеру космоструктурного рисунка исследуемая территория имеет большое сходство с эндогенными системами, дешифрованными и описанными в различных регионах [1–3]. Основными элементами такого рода структур являются линейные шовные зоны, представляющие собой складчато-разломные тектониче-

ские системы, сопровождающиеся повсеместным проявлением метаморфизма различных фаций и метасоматических преобразований вмещающих пород. В гравитационном поле данные процессы отражаются в виде региональных или локальных (в зависимости от масштабности проявления) отрицательных аномалий в центральных областях шовных зон.

На основании сходства космоструктурного рисунка, отражающего строение и закономерности формирования систем, можно предположить и сходство в истории геологического развития исследуемой территории с данными системами.

Полученные космоструктурные данные и основанные на них выводы о закономерностях размещения месторождений УВ на исследуемой территории достаточно хорошо коррелируются с региональными моделями и структурными построениями, основанными на геофизических методах [4–13].

Заключение

Наиболее ранними по возрасту формирования на изучаемой территории являются Северо-Восточная и Юго-Западная зоны «флюидомиграции», связанные, по-видимому, с разломно-складчатых структурами фундамента, формировавшимися до Худосейской рифтогенной структуры и имеющими северо-западное простирание. Образование данных зон, вероятно, связано с древними разломными системами, являвшимися и флюидопроводниками, развитие которых привело к насыщению приразломных областей глубинными компонентами и перераспределению части вещества вмещающих пород.

Следующий этап становления структур района связан с Худосейским рифтом. С данным этапом структурообразования связано, видимо, формирование кольцевых структур разного ранга как реакции среды на тектонические возмущения вдоль Худосейской рифтогенной системы. Эти же возмущения могли, по нашему мнению, оказать решающее влияние на формирование структурных ловушек и миграцию углеводородов. Худосейский рифт хотя и формировался на ранних стадиях как структура растяжения, в более позднее время мог испытать сжатие с образованием сопряженной системы разрывных нарушений северо-восточного простирания, по кинематике, вероятнее всего, отвечающих сдвигам и оказавших деформирующее влияние на возникшие в более раннее время структурные ловушки.

Разрывные нарушения субширотного и северо-западного простирания могут быть отнесены к наиболее молодым структурам, поскольку они не образуют мощных зон, а, как правило, выражены отдельными швами.

В результате дешифрирования и анализа космоструктур района Большехетской структурной террасы было установлено, что все известные ме-

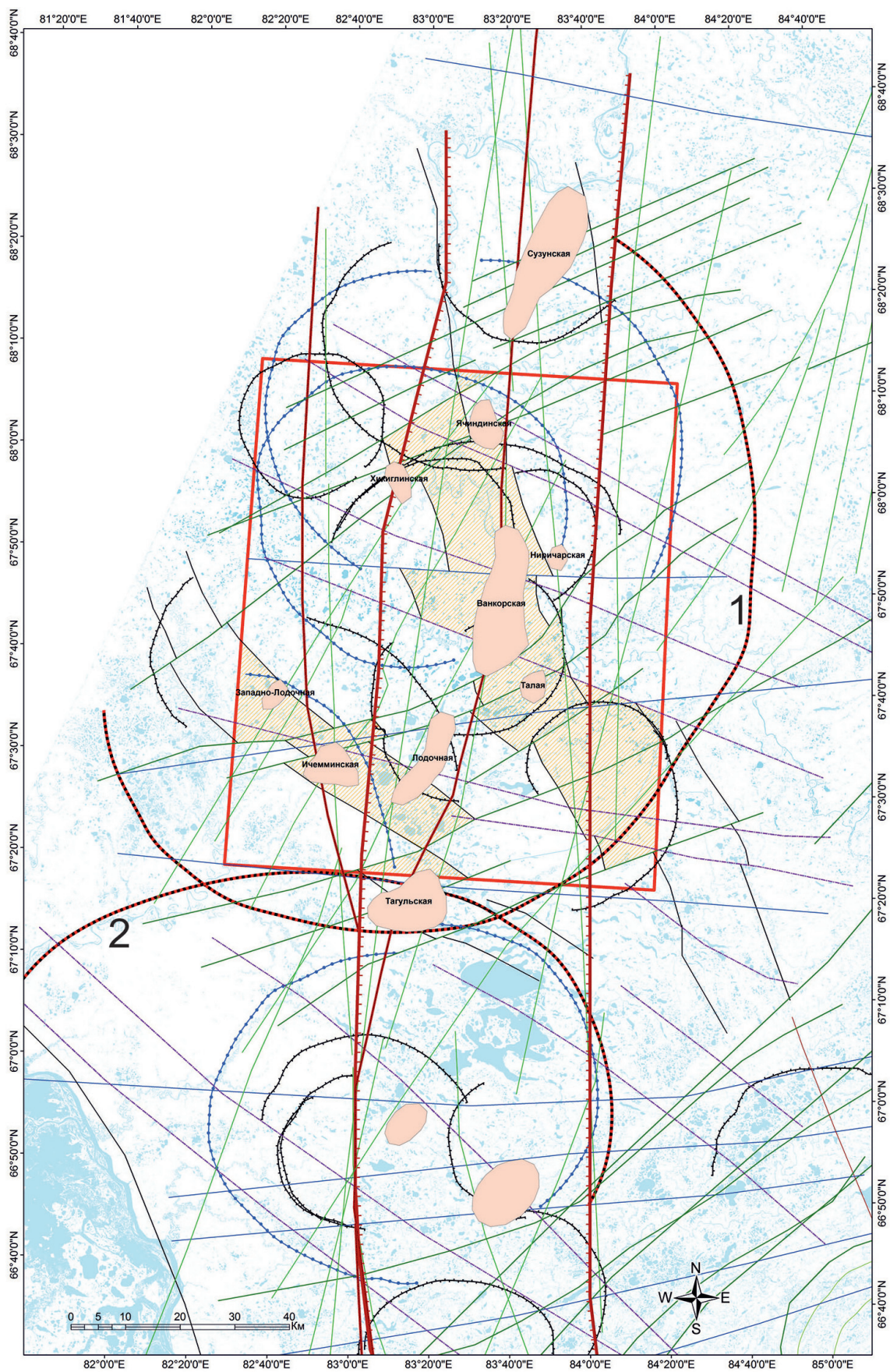


Рис. 4. Космоструктурная схема района Большехетской структурной террасы: 1–7 – кольцевые структуры, ранжированные по радиусам: 1) 1; 2) 2; 3) 3; 4) 4–12; 5) 13–25; 6) 28–42; 7) 58–83 км (1 – Ванкорская; 2 – Чировая); 8–13 – линейменты, соответствующие разрывным структурам: 8) границы «Главной» линейментной зоны; 9) субмеридиональные первого порядка (региональные); 10) северо-восточного простирания; 11) субширотного простирания; 12) северо-западного простирания; 13) второго порядка различных направлений; 14) зоны флюидомиграции; 15) нефтегазовые месторождения и перспективные структуры

Fig. 4. Space structural scheme of Bolshekhetsky structural terrace area. 1–7 are the circular structures ranged by radius: 1) 1; 2) 2; 3) 3; 4) 4–12; 5) 13–25; 6) 28–42; 7) 58–83 km (1 – Vankorsky; 2 – Chirovy); 8–13 are the lineaments considered as faults: 8) margins of the «Main» lineament zone; 9) submeridional of the first order (regional); 10) northeast strike faults; 11) sublatitudinal strike faults; 12) northwest strike faults; 13) faults of the second order of different orientation; 14) zones of fluidomigration; 15) oil-gas deposits and promising structures

сторождения нефти и газа на данной территории имеют вполне закономерную локализацию:

- месторождения залегают в пределах зон флюидомиграции (Северо-восточной и Юго-западной);
- объекты нефти и газа лежат в пределах кольцевых структур, иногда нескольких рангов. Наиболее крупное Ванкорское месторождение приурочено к центральной части самой крупной в районе одноименной кольцевой структуры радиусом более 80 км;

- все месторождения залегают в пределах «Главной» линейментной зоны, отвечающей Худосейскому рифту, или на ее сателлитных разломах;
 - размещение месторождений в пределах выше обозначенных структур контролируется поздними нарушениями северо-восточного простирания.
- Совокупность полученных данных о приуроченности известных месторождений к выделенным структурам позволяет сформулировать комплекс критериев по локализации новых перспективных площадей в изученном районе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дистанционные методы геологических исследований, прогнозирования и поиска полезных ископаемых (на примере Рудного Алтая) / А.А. Поцелуев, Ю.С. Ананьев, В.Г. Житков, В.Н. Назаров, А.С. Кузнецов. – Томск: STT, 2007. – 228 с.
2. Поцелуев А.А., Ананьев Ю.С., Житков В.Г. Дистанционные методы геологических исследований, прогнозирования и поисков месторождений полезных ископаемых. – Томск: STT, 2014. – 304 с.
3. Поцелуев А.А., Ананьев Ю.С., Житков В.Г. Картирование погребенных палеодолин и кор выветривания по материалам современных космических съемок // Материалы XIV Международного совещания «Россыпи и месторождения кор выветривания: современные проблемы исследования и освоения» (РКВ-2010) (Новосибирск, 2–10 сентября 2010 г.). – Новосибирск: Изд-во «Апельсин», 2010. – С. 570–574.
4. Кринин В.А. Тектоника фундамента и оценка ресурсов нефти юрско-меловых отложений северо-востока Западно-Сибирской плиты в пределах Красноярского края // Горные ведомости. – 2011. – № 9. – С. 16–24.
5. Агульник И.М. Оценка нефтегазоносности структур в условиях Западно-Сибирской низменности с помощью гравиразведки // Прямые поиски нефти и газа геофизическими методами. – М.: Недра, 1971. – С. 48–51.
6. Бененсон В.А. Строение фундамента Западно-Сибирской плиты в свете новой геолого-геофизической информации // Геотектоника. – 1986. – № 4. – С. 117–121.
7. Варламов И.П. Постэоценовые тектонические движения Сибирской платформы // Геология и нефтегазоносность Ленотунгуской провинции / под ред. Н.В. Мельникова. – М.: Недра, 1977. – С. 95–108.
8. Сурков В.С. Строение грабен-рифтов и нефтегазоносность Западно-Сибирской низменности // Рифтогенез и нефтегазоносность. – М.: Наука, 1993. – С. 77–84.
9. Сурков В.С., Жеро О.Г. Фундамент и развитие платформенного чехла Западно-Сибирской плиты. – М.: Недра, 1981. – 141 с.
10. Горелов О.К. Морфоструктурный анализ нефтегазоносных территорий. – М.: Наука, 1972. – 216 с.
11. Тальвирский Д.Б. Тектоника Енисей-Хатангской нефтегазоносной области и сопредельных территорий по геофизическим данным. – М.: Недра, 1976. – 168 с.
12. Аэрокосмические методы геологических исследований / под ред. А.В. Перцова. – СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2000. – 316 с.
13. Калмыков В.Д., Серокуров Ю.Н. Приемы выделения рудоконтролирующих линейных структур по материалам дешифрирования космических снимков // Геология и разведка. – 1991. – № 9 – С. 75–79.
14. Цифровая обработка спектрональных снимков для целей оптического районирования рудоносных площадей / В.Ю. Лосев, В.В. Новиков, Х.Г. Таджидинов, А.К. Басанин // Исслед. Земли из космоса. – 1990. – № 2. – С. 97–104.
15. Требования к дистанционной основе государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200 000 (третьего поколения) // Аэрокосмические методы геологических исследований / под ред. А.В. Перцова. – СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2000. – С. 304–313.
16. Moghtaderi A., Moore F., Mohammadzadeh A. The application of advanced space-borne thermal emission and reflection (ASTER) radiometer data in the detection of alteration in the Chadormalu paleocrater, Bafq region, Central Iran // Journal of Asian Earth Sciences. – 2007. – V. 30. – № 2. – P. 238–252.
17. Nash G.D., Johnson G.W., Johnson S. Hyperspectral detection of geothermal system-related soil mineralogy anomalies in Dixie Valley, Nevada: a tool for exploration // Geothermics. – 2004. – Vol. 33. – № 6. – P. 382–396.
18. Petrovic A., Khan S.D., Chafetz H.S. Remote detection and geochemical studies for finding hydrocarbon-induced alterations in Licbon Valley, Utah // Marine and Petroleum Geology. – 2008. – V. 25. – № 8. – P. 696–705.
19. Rowan L. C., Mars J. C. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data // Remote Sensing of Environment. – 2003. – V. 84. – № 3. – P. 350–366.
20. Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review ISPRS // J. Photogramm. Remote Sens. – 2014. – V. 92. – P. 79–97.

21. Progress in Location-Based Services 2014. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography / Eds. G. Gartner, H. Huang. – Switzerland: Springer, 2015. – 282 p.
22. Grejner-Brzezinska D., Toth Ch., Jozkow G. On sensor georeferencing and point cloud generation with sUAS // Proc. of the ION 2015. Pacific PNT Meeting. – Honolulu, Hawaii, April 20–23, 2015. – P. 839–848.
23. Gwenzi D., Lefsky M.A. Prospects of photon counting lidar for savanna ecosystem structural studies // ISPRS Technical Commission I Symposium, Sustaining Land Imaging: UAVs to Satellites. – Denver, Colorado, USA, 17–20 November 2014. – P. 141–147.
24. Parallel faithful dimensionality reduction to enhance the visualization of remote sensing imagery / Safa N., Alaa N., Ik Soo Lim, Mohammed Saeed // Neurocomputing. – 2015. – V. 168. – P. 560–565.
25. Software to facilitate remote sensing data access for disease early warning systems / Y. Liu, J. Hu et al. // Environmental Modelling & Software. – 2015. – V. 74. – P. 247–257.
26. Safwat G., Safaa H., Mohamed S. Prospecting for new gold-bearing alteration zones at El-Hoteib area, South Eastern Desert, Egypt, using remote sensing data // Ore Geology Reviews. – 2015. – V. 71. – P. 1–13.

Поступила 20.01.2016 г.

Информация об авторах

Житков В.Г., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры общей геологии и землеустройства Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

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

Ананьев Ю.С., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кринин В.А., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой геологии нефти и газа Института нефти и газа Сибирского федерального университета.

UDC 553.98:528.8(571.51)

NEW DATA FOR STRUCTURAL POSITION OF VANKOR OIL-GAS DEPOSIT AND SURROUNDING AREA

Vladimir G. Zhitkov¹,

vlgitkov@tpu.ru

Anatoly A. Potseluev¹,

poan@tpu.ru

Yuriy S. Ananiev¹,

ananievus@tpu.ru

Vladimir A. Krinin²,

Vkrinin@sfu-kras.ru

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

² Siberian Federal University,
86, bld. 2, Svobodny Avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russia.

The relevance of the discussed issue is caused by the need of increasing prospecting efficiency on the base of structural-tectonic factors of large oil-gas deposits localization and subsequent application of the revealed features for new areas.

The main aim of the study is to clarify structural-tectonic environment which control localization and inner structure of oil-gas fields and deposits of Vankor type on the basis of a space-structural scheme of Vankor oil-gas deposit and surrounding territory.

The methods used in the study: processing, analysis and interpretation of high resolution multispectral space imagery data using algorithms of direct filtration, multivariate statistics and map algebra.

The results. The authors have studied geological structures of Purtazovskaya oil-gas area attached to Vankor oil-gas deposit using the materials of remote sensing data obtained from Landsat ETM+, TERRA ASTER and ERS-ENVISAT satellites. Wide developed faults of different orientation, circular, arc shaped and polygonal structures which control localization of the oil-gas deposits in the area and the sequence of their forming were clarified. The set of the data obtained allows stating the complex of criteria for new promising areas. It was revealed that all discovered oil and gas deposits within the area are located in limits of zones of fluidomigration which are tightly related to concentric circular structures. All the deposits are situated in margins of a lineament zone which reflects the location of Khudo-seysky Rift or its satellite faults. Location of the deposits within the limits which are upper than the designated structures is controlled by later faults of east-north direction. A set of the obtained data demonstrating tight relation of oil deposits and fixed geological structures, allows us to formulate a complex of criteria considering localization of new prospective sites in the area.

Key words:

Krasnoyarsk Region, Vankor oil-gas area, space imagery, linear structures, circular structures, zones of fluidisation.

REFERENCES

1. Potseluev A.A., Ananiev Yu.S., Zhitkov V.G., Nazarov V.N., Kuznetsov A.S. *Distantionnye metody geologicheskikh issledovaniy, prognozirovaniya i poiska poleznykh iskopaemykh (na primere Rudnogo Altaya)* [Remote methods of geological studies, mineral deposit prognosis and prospecting (by the example of Rudny Altay)]. Tomsk, STT Publ., 2007. 228 p.
2. Potseluev A.A., Ananiev Yu.S., Zhitkov V.G. *Distantionnye metody geologicheskikh issledovaniy, prognozirovaniya i poiskov mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Remote sensing for geological studies, prediction and exploration of mineral deposits]. Tomsk, STT Publ., 2014. 304 p.
3. Potseluev A.A., Ananiev Yu.S., Zhitkov V.G. Kartirovanie pogrebennykh paleodolin i kor vyvetrivaniya po materialam sovremennykh kosmicheskikh semok [Remote sensing data for geological survey of buried paleo-valleys and weathering crust]. *Materialy XIV mezhdunarodnogo soveshchaniya. Rossypi i mestorozhdeniya kor vyvetrivaniya: sovremennyye problemy issledovaniya i osvoeniya* [Proc. 14th Int. Symp. Placer and weathered rock deposits (PWR-2010)]. Novosibirsk, Apelsin Publ., 2010. pp. 570–574.
4. Krinin V.A. Tectonics of basement and estimation of oil resources of Jurassic-Cretaceous deposits in the north-east of Western-Siberian platform within Krasnoyarsk region. *Gornyye vedomosti*, 2011, no. 9, pp. 16–24.
5. Agulnik I.M. Otsenka neftegazonosnosti struktur v usloviyakh Zapadno-Sibirskoy nizmennosti s pomoshchyu gravirazvedki [Estimation of oil-gas potential for geological structures in Western Siberia conditions by gravity exploration]. *Pryamye poiski nefiti i gaza geofizicheskimi metodami* [Prosecting for oil and gas by geophysical methods]. Moscow, Nedra Publ., 1971. pp. 48–51.
6. Benenson V.A. Stroenie fundamenta Zapadno-Sibirskoy platformy [Structure of the basement of Western Siberia platform]. *Geotectonic*, 1977, no. 4, pp. 117–121.
7. Varlamov I.P. Posteoctenove tektonicheskie dvizheniya Sibirskoy platformy [Post Eocene tectonic movements of Siberian Platform]. *Geologiya i neftegazonosnost Leno-Tungurskoy provintsii* [Geology and oil-gas content of Leno-Tungusky province]. Ed. by N.V. Melnikov. Moscow, Nedra Publ., 1977. pp. 95–108.
8. Surkov V.S. Stroenie graben-riftov i neftegazonosnost Zapadno-Sibirskoy nizmennosti [Structure of Graben rifts and oil-gas con-

- tent in Western Siberian lowland]. *Riftogenez i gazonosnost* [Rifting and gas content]. Moscow, NaukaPubl., 1993. pp. 77–84.
9. Surkov V.S., Zhero O.G. *Fundament i razvitie platformennogo chekhla Zapadno-Sibirskoy plity* [Basement and development of the platform cover of Western Siberian plate]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 141 p.
 10. Gorelov O.K. *Morfostrukturny analiz neftegazonosnykh territoriy* [Morphostructural analysis of oil-gas areas]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 216 p.
 11. Talvirsky D.B. *Tektonika Enisey-Khatangskoy neftegazonosnoy oblasti i sopredelnykh territoriy po geofizicheskim dannym* [Tectonic of Enisey-Khatanga oil-gas region and surrounded areas by geophysical data]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 168 p.
 12. *Aerokosmicheskie metody geologicheskikh issledovaniy* [Aerial and satellite imagery methods for geological research]. Ed. by A.V. Pertsov. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2000. 316 p.
 13. Kalmykov V.D., Serokurov Yu.N. Priemy vydeleniya rudokontroliruyushchikh lineynykh struktur po materialam deshifirovaniya kosmicheskikh snimkov [Techniques to identify ore-controlling linear structures in interpretation data of remote sensing imagery]. *Geology and exploration*, 1991, vol. 9, pp. 75–79.
 14. Losev V.Yu., Novikov V.V., Tadzhiddinov Kh.G., Basanin A.K. Tsifrovaya obrabotka spektrozonalnykh snimkov dlya tseley opticheskogo rayonirovaniya rudosnykh ploshchadey [Digital processing of multispectral images for issues of optical zoning for mineralized areas]. *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 1990, no. 2, pp. 97–104.
 15. *Trebovaniya k distantsionnoy osnove gosudarstvennoy geologicheskoy karty Rossiyskoy Federatsii masshtaba 1:200000 (tretego pokoleniya)* [Requirements for remote basis of the statement geological maps of Russian Federation of 1:200,000 scale (third generation)]. Ed. A.V. Pertsov. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2000. pp. 304–313.
 16. Moghtaderi A., Moore F., Mohammadzadeh A. The application of advanced space-borne thermal emission and reflection (ASTER) radiometer data in the detection of alteration in the Chadormalu paleocrater, Bafq region, Central Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, vol. 30, no. 2, pp. 238–252.
 17. Nash G.D., Johnson G.W., Johnson S. Hyperspectral detection of geothermal system-related soil mineralogy anomalies in Dixie Valley, Nevada: a tool for exploration. *Geochemics*, 2004, vol. 33, no. 6, pp. 382–396.
 18. Petrovic A., Khan S.D., Chafetz H.S. Remote detection and geochemical studies for finding hydrocarbon-induced alterations in Licbon Valley, Utah. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, vol. 25, no. 8, pp. 696–705.
 19. Rowan L.C., Mars J.C. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment*, 2003, vol. 84, no. 3, pp. 350–366.
 20. Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review ISPRS. *J. Photogramm. Remote Sens.*, 2014, vol. 92, pp. 79–97.
 21. *Progress in Location-Based Services 2014. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Eds. G. Gartner, H. Huang. Switzerland, Springer, 2015. 282 p.
 22. Grejner-Brzezinska D., Toth Ch., Jozkow G. On sensor georeferencing and point cloud generation with sUAS. *Proc. of the ION 2015. Pacific PNT Meeting*. Honolulu, Hawaii, April 20–23, 2015. pp. 839–848.
 23. Gwenzi D., Lefsky M.A. Prospects of photon counting lidar for savanna ecosystem structural studies. *ISPRS Technical Commission I Symposium, Sustaining Land Imaging: UAVs to Satellites*. Denver, Colorado, USA, 17–20 November 2014. pp. 141–147.
 24. Safa N., Alaa N., Ik Soo Lim, Mohammed Saeed. Parallel faithful dimensionality reduction to enhance the visualization of remote sensing imagery. *Neurocomputing*, 2015, vol. 168, pp. 560–565.
 25. Liu Y., Hu J. Software to facilitate remote sensing data access for disease early warning systems. *Environmental Modelling & Software*, 2015, vol. 74, pp. 247–257.
 26. Safwat G., Safaa H., Mohamed S. Prospecting for new gold-bearing alteration zones at El-Hoteib area, South Eastern Desert, Egypt, using remote sensing data. *Ore Geology Reviews*, 2015, vol. 71, pp. 1–13.

Received: 20 January 2016.

Information about the authors

Vladimir G. Zhitkov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

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

Yuriy S. Ananiev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vladimir A. Krinin, Cand. Sc., Head of the Department, Siberian Federal University.

УДК 553.411.071.242.4+550.4

ПЕТРОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ЧЕРТЫ РУДОВМЕЩАЮЩЕГО СУБСТРАТА В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЗОЛОТА. ЧАСТЬ 1. ПЕТРОЛОГИЯ ОКОЛУРУДНОГО МЕТАСОМАТИЗМА

Кучеренко Игорь Васильевич,

kivr@tpu.ru

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

Актуальность исследования заключается в необходимости корректировки и углубления геологической (металлогенической) составляющей теории образования гидротермальных месторождений золота, в рамках которой противоречивые представления о геологической обусловленности рудообразования (источниках энергии и металлоносных флюидов) укладываются в четыре конкурирующих, исключают одна другую, гипотезы, вследствие чего невозможно разработать комплекс эффективных прогнозно-поисковых критериев оруденения.

Цель исследования: посредством использования альтернативной существующим методологии и следующих из нее методов петролого-геохимических исследований рудовмещающего, в том числе черносланцевого, субстрата получить данные (достоверные факты), способные обеспечить: 1) доказательство принадлежности эпигенетических минеральных ассоциаций этапа рудообразования в толщах околорудно-измененных углеродистых (черных) сланцев, вопреки популярным представлениям, к метасоматическим формациям и, как следствие, вещественно-генетической однородности апочерносланцевых зональных метасоматических колонок (ореолов) с образованными в несланцевом (кристаллическом) субстрате; 2) на гипсометрических уровнях залегания оруденения доказательство внешних (внепорудных) источников золота и сопровождающих металлов, сосредоточенных в рудах месторождений, образованных в толщах черных сланцев.

Методы исследования: 1) на полевом этапе изучения рудовмещающего субстрата и руд – составление геологических разрезов, ориентированных вкрест простирания околорудных метасоматических ореолов (колонок) и, как правило, выходящих за пределы или на дальнюю их периферию, с отбором проб многоцелевого назначения массой 1,5...2,0 кг; 2) подготовка (измельчение, стирание) проб без сокращения для анализов в лицензированных лабораториях с соблюдением приемов, обеспечивающих их чистоту; 3) диагностика химических составов минеральных видов и разновидностей в электронных микроскопах с рентгеноспектральным сопровождением; 4) полный химический (мокрый) силикатный анализ проб горных пород; 5) атомно-абсорбционный (чувствительность $1 \cdot 10^{-8}$ мас. % для золота, серебра, $5 \cdot 10^{-7}$ мас. % для ртути), контрольные нейтронно-активационный и химико-спектральный анализы на золото (чувствительность $1 \cdot 10^{-8}$ и $3 \cdot 10^{-8}$ мас. % соответственно); 6) петрохимические пересчеты результатов полных химических силикатных анализов горных пород по объемно-атомному методу; 7) балансовые расчеты межзональной миграции петрогенных химических элементов в околорудных метасоматических колонках; 8) расчеты статистических параметров распределения и баланса металлов в околорудном, междурудном пространстве месторождений с использованием двухуровневой системы выборок, обеспечивающие реконструкцию геологической истории химических элементов и, на этой основе, корректную оценку донорского потенциала горных пород, включая черные сланцы.

Результаты исследования. В результате исследований, выполненных в шестнадцати золоторудных месторождениях обеих совокупностей южного горно-складчатого обрамления Сибирского кратона, реконструирована двух-, трехэтапная история формирования несланцевого и черносланцевого рудовмещающего субстрата, разработана единая (типовая) петролого-геохимическая модель околорудных зональных метасоматических ореолов (колонок), представляющих сочетание березитовой во внутренних и пропилитовой в промежуточной хлоритовой и фронтальной зонах формаций. Полиминеральный состав тыловой (березитовой) зоны, отличный от двухкомпонентного (кварц, серицит) состава теоретической модели Д.С. Коржинского, формируется в системе порода–раствор, открытой в сторону выноса (Na, Si) и привноса компонентов, поступающих с металлоносными растворами извне и фиксируемых в собственных минеральных новообразованиях и в качестве примесей преимущественно во внутренних зонах. Согласно балансовым расчетам, в ореолы и руды поступает калий (серицит), восстановленная сера (сульфиды), окисленный (карбонат) и восстановленный (кероген, углеводороды) углерод, рудогенные (Au, Ag, As, Hg и др.), в обрамлении рудоконтролирующих через раствороподводящую функцию глубинных разломов – петрогенные фемофильные (Ti, P, Mg, Fe, Ca, Mn) элементы. Контрастность аномалий достигает многих сотен и тысяч %. Ti и P образуют собственные минеральные фазы – рутил, лейкоксен, апатит, Mg, Fe, Ca, Mn входят в состав карбонатов, другие металлы фиксируются в собственных минералах и примесях. Распределение золота и сопровождающих металлов в околорудном пространстве подчиняется метасоматической зональности – околорудные геохимические ореолы всегда занимают меньшие объемы сравнительно с околорудными метасоматическими. Это выражается в субкларковых содержаниях (золота 0,5...1,2 мг/т) и низкой дисперсии распределения золота, серебра, ртути в разных породах, включая регионально-метаморфизованные на уровне мусковит-биотитового парагенезиса черные сланцы вне и в подзоне слабого изменения фронтальной зоны околорудных метасоматических ореолов, и в последовательном увеличении этих параметров, а также золото-серебряного отношения и силы корреляционных связей золота с серебром от одной минералого-петрохимической зоны к другой по мере усиления околорудных метасоматических преобразований пород с достижением максимальных значений в тыловой зоне, тем больших, чем выше содержания металлов в рудах. Полученные результаты доказывают вещественно-генетическую однородность производных рудообразующих процессов в несланцевом и черносланцевом субстрате и синрудное происхождение контрастных геохимических аномалий металлов (сверхкларковых их содержаний) в околорудном пространстве мезотермальных золоторудных месторождений. В первой части статьи приведены результаты изучения околорудных метасоматических ореолов (колонок), во второй – результаты изучения распределения рудогенных (Au, Ag, Hg) элементов в околорудном пространстве, обсуждаются петролого-геохимические материалы и формулируются выводы.

Ключевые слова:

Гидротермальные месторождения золота, кристаллический (несланцевый) субстрат, черные сланцы, околорудные (рудовмещающие) зональные метасоматические, геохимические ореолы.

Постановка задачи

Один из итогов столетних исследований проблемы образования гидротермальных месторождений золота заключается в разработке четырех с вариантами гипотез, каждая из которых исключает остальные: гранитогенной, обсуждаемой в работах R. Mustard et al. [1], А.И. Гусева [2], Martinez-Abad et al. [3], Tran Tuan Anh et al. [4]; базальтогенной, доказываемой в работах В.Л. Русинова и др. [5], П.В. Комарова и др. [6], S. Sarangi [7], I.V. Kucherenko et al. [8, 9]; метаморфогенной, рассмотренной в трудах В.А. Бураяка и др. [10], J.S. Goldberg et al. [11], J. Shao et al. [12], R. Large et al. [13], S. Meffre et al. [14], С.Г. Кряжева и др. [15], И.В. Чернышова и др. [16], М.А. Юдовской и др. [17], А.И. Khanchuk et al. [18], Wang Jianping et al. [19], J.A. Steadman et al. [20]; полигенной, приведенной в публикациях М.И. Кузьмина и др. [21], Н.П. Лаверова и др. [22] и других. Сосуществование гипотез может быть мирным, если каждая из них описывает условия образования разных месторождений и, возможно, отражает конвергенцию рудообразования, и/или конкурентным, если все они или в разных сочетаниях предложены, что нередко, для объяснения условий образования одного месторождения.

Состояние неопределенности в оценке каждой гипотезы, обусловленное дефицитом достоверных эмпирических данных, трудностями, связанными с их интерпретацией и реконструкцией процессов рудообразования по оставленным ими вещественным следам, оказывает негативное влияние на совершенствование теории и прогнозно-поисковых критериев оруденения, значение которых возрастает по мере неизбежной смены приоритетов на прогнозирование и поиски месторождений, залегающих на экономически приемлемых глубинах, но не вскрытых эрозией.

К числу ключевых из ряда дискуссионных вопросов, в частности, относятся:

- принадлежность апосланцевых ореолов околорудно-измененных пород к метасоматическим формациям или субфациям регионального «регрессивного» метаморфизма (гидратации);
- происхождение повышенной, высокой золотосодержимости черных сланцев в околорудном пространстве как следствие накопления золота и сопутствующих металлов при седиментации и/или предрудном инициирующем рудообразовании региональном метаморфизме и/или позднем (завершающем) магматогенном рудообразовании;
- обоснованность противопоставления по геолого-генетическим показателям месторождений, образованных в несланцевом и черносланцевом субстрате.

Корректное решение перечисленных вопросов возможно посредством разработки взамен применяемых в течение нескольких десятилетий, но, судя по числу исключаящих одно другое решений,

не оправдывающих себя методов, альтернативной методологии петролого-геохимических исследований, призванной обеспечить:

- дифференциацию минерального состава вмещающих месторождения горных пород на минеральные комплексы, отвечающие этапу их первоначального образования и каждому этапу последующих изменений, включая этап завершающего рудообразования;
- создание на этой основе рациональной поэтапной системы формирования выборок для балансовых и статистических расчетов, необходимых для реконструкции геологической истории петрогенных и рудогенных элементов в междрудном, околорудном пространстве как средства достижения главной цели петрохимии и геохимии – выяснения условий и масштабов миграции (концентрирования, рассеяния) химических элементов от этапа к этапу формирования итогового состава горных пород;
- сравнительный анализ результатов петролого-геохимических исследований рудовмещающего кристаллического и черносланцевого субстрата на предмет выяснения вещественно-генетической однородности или вещественно-генетических различий минеральных комплексов, образованных в том и другом субстрате месторождений золота (рисунок) на этапе рудообразования.

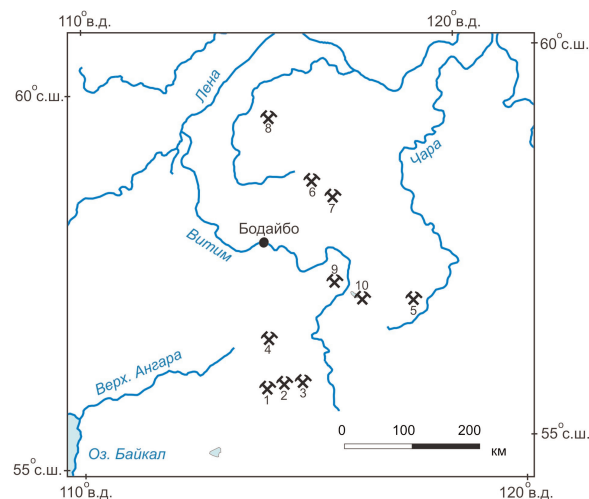


Рисунок. Схема расположения гидротермальных месторождений золота в юго-восточном горно-складчатом обрамлении Сибирского кратона: 1 – Западное; 2 – Ирокиндинское; 3 – Кедровское; 4 – Богодиканское; 5 – Верхне-Сакуканское; 6 – Сухоложское; 7 – Вернинское; 8 – Чертово Корыто; 9 – Каралонское; 10 – Уряхское

Figure. Location of hydrothermal gold deposits in south-east mountain-folded framing of Siberian craton: 1 is Zapadnoe; 2 is Irokindinskoe; 3 is Kedrovskoe; 4 is Bogodikanskoe; 5 is Verkhne-Sakukanskoe; 6 is Sukholozhskoe; 7 is Verninskoe; 8 is Chertovo Koryto; 9 is Karatonskoe; 10 is Uryakhskoe

В результате выполненных петролого-геохимических исследований в околорудном пространстве, сложенном различными по составу, происхождению, возрасту кристаллическими породами и черносланцевыми толщами, оконтурены вскрытые на полную мощность или частично крупно- и мало-объемные околорудные метасоматические ореолы, установлены аутентичные минеральный состав, порядок минерало-петрохимической зональности, принадлежность околорудных метасоматических ореолов к сочетанию березитовой во внутренних и пропилитовой в периферийных зонах метасоматических колонок, дифференцированы по этапам образования минеральные комплексы, реконструированы причинно-следственные соотношения руд, околорудных геохимических ореолов с околорудными метасоматическими. Перечисленные данные обеспечили разработку типовой универсальной схемы минерало-петрохимической и геохимической зональности, составившей основу единой объемной петролого-геохимической модели околорудных метасоматических ореолов во вмещающем золоторудные месторождения кристаллическом и черносланцевом субстрате, обоснование и обсуждение которой составляет содержание статьи.

Методы исследования

Полевое изучение рудовмещающего субстрата и руд включало составление детальных, в масштабах 1:50–1:200, ориентированных вкрест простирания околорудных метасоматических ореолов и, как правило, выходящих за их пределы геологических разрезов на поверхности, в подземных горных выработках и скважинах протяженностью до многих сотен метров с отбором штучных проб массой в среднем 1,5...2,0 кг и интервалами между точками опробования от первых сантиметров до первых-многих метров.

Пробы тщательно очищались от загрязняющих продуктов, включая прожилки, дробились вручную на стальной плите и подвергались стиранию на виброистирателе. На каждой стадии обработки после каждой пробы инструмент промывался горячей водой и протирался белой тканью. Партии проб с ожидаемыми минимальными содержаниями металлов обрабатывались в первую очередь.

Пробы не сокращались и имели многоцелевое назначение – как базовые для отбора навесок для химического силикатного, атомно-абсорбционно-химико-спектрального и других анализов.

Полные химические (мокрые) силикатные анализы горных пород выполнены в Центральной лаборатории ПГО «ЗапСибгеология» и в Западно-Сибирском испытательном центре (г. Новокузнецк) под руководством И.А. Дубровской и Г.Н. Юминой. Содержание Au и Ag определялось атомно-абсорбционным методом, предел обнаружения $1 \cdot 10^{-8} \%$, в лаборатории ядерно-физических методов анализа вещества Объединенного Института геологии, геофизики и минералогии и в Аналити-

ческом центре Института геологии и минералогии СО РАН, аналитик В.Г. Цимбалит, содержание Hg – атомно-абсорбционным методом, предел обнаружения $5 \cdot 10^{-7} \%$, в Центральной лаборатории ПГО «Березовгеология» (г. Новосибирск), аналитик Н.А. Чариков.

Петрохимические пересчеты полных химических силикатных анализов горных пород выполнены по объемно-атомному методу.

Коэффициенты распределения (привноса, выноса) петрогенных элементов в метасоматических колонках – количественное выражение их баланса в объеме колонок – рассчитаны путем соотношения массы каждого элемента в стандартном объеме (10000 \AA^3) конкретной минерало-петрохимической зоны к массе его в том же объеме исходной породы. Введенный нами аддитивный показатель удельная масса перемещенного вещества (Δ), определяемый посредством соотношения общей массы в стандартном объеме перемещенного (привнесенного и вынесенного) в каждой зоне вещества (суммы масс элементов) к массе его в таком же стандартном объеме исходной породы, позволяет оценить интенсивность метасоматических преобразований химических составов пород в целом на количественной основе.

Расчеты статистических параметров распределения и баланса петрогенных и рудогенных элементов в околорудном пространстве выполнялись для частных метасоматических колонок и для литотипов (петротипов) пород в целом по золоторудным месторождениям с использованием двухуровневой системы петрохимических и геохимических выборок, составленных с учетом принадлежности проб к видам (разновидостям) исходных пород, а в слоистых толщах черных сланцев, кроме того, – к мусковит-биотитовой зоне дорудных ареалов регионального метаморфизма нагревания (нижний уровень), и к минеральным зонам околорудных метасоматических ореолов (верхний уровень).

Двухуровневая система выборок адекватна геологической ситуации, которая заключается в том, что плутонические (гранитоиды) и ультраметаморфические (гнейсы, мигматиты и др.) породы способны сохраняться в их первозданном виде бесконечно долго (миллиарды лет) и сохранились вплоть до этапа рудообразования, а толщи черных сланцев хотя и подверглись на дорудных этапах зональному региональному метаморфизму нагревания, но в изученных золоторудных месторождениях представляют обширную периферийную относительно низкотемпературную минеральную зону его ареалов, содержащую мусковит-биотитовый метаморфический парагенезис в сохранившихся состав и строение осадочных породах.

Анализ содержаний в породах металлов по атомно-абсорбционному методу сопровождался внутренним и внешним по химико-спектральному, нейтронно-активационному методам контролем (табл. 1).

Таблица 1. Оценка сходимости результатов определения разными методами содержания золота и серебра в породах

Table 1. Appraisal of results precision when determining gold and silver content in rocks using different methods

| Элементы Elements | Сравниваемые методы анализов Compared methods | Выборки Sampling | Интервалы содержаний, мг/т Content intervals, mg/t | | | | | | | | |
|----------------------|--|---------------------|---|----------|----|------------|----------|----|-----------|----------|----|
| | | | 0,5...10 | | | 10,1...100 | | | Более 100 | | |
| | | | Параметры/Parameters | | | | | | | | |
| | | п | δ | σ | п | δ | σ | п | δ | σ | |
| Au | AA-ААк | 1 | 88 | 1,2 | 23 | - | - | - | - | - | - |
| | | 2, 3, 4 | 136 | 0,8 | 18 | 5 | 6,3 | 26 | - | - | - |
| | AA-ХС | 1a | 55 | 2,2 | 46 | - | - | - | - | - | - |
| | | 5, 6, 7 | 126 | 2,6 | 51 | 14 | 40 | 61 | 12 | 3086 | 78 |
| AA-НА | 8 | 22 | 1,1 | 23 | - | - | - | - | - | - | |
| Ag | AA-ААк | 9 | 219 | 52 | 14 | - | - | - | - | - | - |
| | | 10 | 22 | 1,3 | 11 | 137 | 14 | 13 | 53 | 124 | 18 |

Примечание. Содержание Au и Ag определялось методами: всего массива проб, как отмечалось, атомно-абсорбционным (АА) с внутренним контролем (ААк), химико-спектральным (ХС), предел обнаружения $3 \cdot 10^{-8}$ %, в Центральной лаборатории ПГО «Читагеологоразведка», аналитик В.Н. Сысоева (г. Чита), нейтронно-активационным (НА), предел обнаружения $1 \cdot 10^{-8}$ %, в лаборатории ядерно-физических методов анализа НИИ ядерной физики при Томском политехническом университете, аналитик В.А. Чесноков. Выборки 1, 1a – углеродистые терригенные сланцы и метасоматиты по ним, остальные выборки – граниты, гнейсы, магматиты, габбро, долериты, вулканиты и метасоматиты по ним, выборка 9 включает пробы без дифференциации по содержанию металла. п – число пар сравниваемых анализов; δ – средняя квадратическая ошибка разности, мг/т; σ – средняя относительная ошибка по разностям двойных измерений, %. Расчеты выполнены Н.П. Ореховым.

Note. Au and Ag contents were determined by atomic absorption (AA) with inside control (AAk), chemical-spectral method, finding limit is $3 \cdot 10^{-8}$ %, in Central Laboratory «Chitageologorazvedka», the analyst is V.N. Sysoeva (Chita), neutron simulating (NA), finding limit is $1 \cdot 10^{-8}$ %, in the laboratory of nuclear-physical analytical method of the SRI nuclear physics at Tomsk polytechnic university, the analyst is V.A. Chesnokov. Samples 1, 1a are carbonaceous terrigenous slates and metasomatites by them, the rest samples – granites, gneisses, migmatites, gabbro, dolerites, volcanites and metasomatites by them, sample 9 includes the samples without differentiation by metal content. p is the number of pairs of the compared analyses; δ is the mean square error of difference, mg/t; σ is the mean relative error by the differences of double dimensions, %. The calculations were carried out by N.P. Orekhov.

В качестве меры сходимости результатов, полученных разными методами, использовалась средняя относительная ошибка по разностям двойных измерений, значения которой не зависят от содержания в пробах металлов. Поскольку относительная погрешность анализов не превышает, как правило, значений природной изменчивости содержаний металлов, полученные аналитические данные оценены как пригодные для решения поставленных задач.

Распределение в околорудном пространстве золоторудных месторождений главных рудогенных элементов – геохимических и металлогенических спутников Au, Ag, Hg – характеризуют статистические параметры и коэффициенты.

Реализованная в рамках принятой методологии петролого-геохимических исследований система расчетов и сравнения их результатов обеспечила корректную оценку уровней металлоносности исходных рудовмещающих пород, в том числе метаморфизованных черных сланцев, по их видам, происхождению, возрасту, а также генетическую интерпретацию структуры околорудных геохимических ореолов, происхождения геохимических аномалий, взаимосвязей и взаимообусловленности околорудных метасоматических, геохимических ореолов и руд.

Разработанная петролого-геохимическая модель использована, в частности, в качестве эталонной при исследовании рудовмещающих гидротермально измененных черных сланцев позднерифейских хомолхинской, имняхской, аунакитской свит в Сухоложском и Вернинском месторождениях Ленского района [23, 24] в связи с тем, что поздние минеральные ассоциации этапа околорудного метасоматизма и рудообразования в черных сланцах Сухого Лога до сих пор [17], вслед за В.А. Буряком [10], идентифицируются с субфациями «регрессивного» регионального метаморфизма гидратации, что означает признание метасоматических пород метаморфическими.

Результаты исследования

Минеральная зональность околорудных метасоматических ореолов

В изученных золоторудных месторождениях образованы разнообъемные метасоматические ореолы, структура (зональность) и минералогическая структура которых в различных породах, включая углеродистые сланцы, однообразны. Сохранившиеся в «останцах» исходные кристаллические породы (архейские и позднепалеозойские ультраметаморфиты, раннепротерозойские, палеозойские гранитоиды), как отмечалось, не приобретают минеральных новообразований до начала рудообразующих процессов в отличие от стратифицированных осадочных и вулканогенных пород, подвергшихся региональному метаморфизму разных фаций. Смена последних в пространстве определяет региональную метаморфическую зональность, в схеме которой расстояния между изоградами достигают многих километров. В противоположность околорудным метасоматическим ореолам минеральные зоны ареалов регионального метаморфизма не обнаруживают зависимости от положения относительно рудных тел, разломов и вообще различных зон повышенной проницаемости, и каждая из них занимает обширные пространства с постоянными минеральными составами. Например, черносланцевые толщи раннепротерозойской михайловской свиты в Патомском нагорье, позднерифейских кедровской, водораздельной, мухтунной свит в Северном Забайкалье, хомолхинской, имняхской, аунакитской, вачской, догал-

дынской свит Бодайбинского и Марокано-Илигирского прогибов в Ленском районе, вне локальных (вдоль глубинных разломов) рудовмещающих метасоматических ореолов, сложены углеродистыми сланцами, несущими однообразный мусковит-биотитовый метаморфический парагенезис, к которому в направлении к обрамляющим прогибы очагово-купольным ультраметаморфическим комплексам в смежных минеральных зонах ареалов регионального метаморфизма нагревания, например, добавляются гранат и другие высокотемпературные и высокобарические минералы.

Принадлежность поздних околорудных метасоматических ореолов к этапам рудообразования, то есть квалификация их как околорудных, доказывается порядком минералого-петрохимической зональности с закономерной сменой минералого-петрохимических зон по мере приближения к рудным телам и усилением в этом направлении степени минералого-химических преобразований пород внутри каждой зоны и от зоны к зоне.

Типовая универсальная метасоматическая колонка включает четыре минералого-петрохимических зоны – фронтальную, хлоритовую (эпидотовую, эпидот-хлоритовую), альбитовую, тыловую (табл. 2).

В зависимости от степени трещиноватости (проницаемости) пород мощность зон варьирует в широких пределах. Мощность наиболее крупнообъемной фронтальной зоны изменяется от метров – десятков метров в массивных кристаллических породах до многих сотен метров, иногда более – в трещиноватых высокопроницаемых породах. В последнем случае нередко ореолы соседних рудных тел сливаются своими фронтальными частями, образуя единый ореол рудного поля, как, например, это произошло в Сьюлбанской золоторудной зоне, насыщенной субпараллельными глубинными разломами. Напротив, в Верхне-Сакуканском, Богодиканском и некоторых других месторождениях в Северном Забайкалье, залегающих среди массивных гранитоидов, околорудные метасоматические ореолы, а следовательно, и фронтальная зона, более локальны и имеют мощность до нескольких десятков метров. Фронтальная (в некоторых случаях хлоритовая), альбитовая зоны дифференцированы на подзоны слабого, умеренного, интенсивного изменения с объемами минеральных новообразований во фронтальной зоне, например, соответственно 0...10, 10...20, 20...30 об. %. При расчете баланса петрогенных элементов в ореолах в отсутствие по объективным обстоятельствам не измененных в рудообразующих процессах пород это обеспечивает возможность соотносить изообъемные массы петрогенных элементов метасоматитов с соответствующими массами наименее измененных пород, в которых миграция вещества за пределы подзоны редко улавливается. Мощность хлоритовой (эпидотовой, эпидот-хлоритовой) зоны составляет десятки сантиметров ... де-

сятки метров, альбитовой – сантиметры ... первые метры, тыловой – сантиметры ... 1,5 метра.

В массивных (слабопроницаемых) породах, как правило, сохраняется порядок минералого-петрохимической зональности. Насыщенность блоков рудных полей зонами повышенной проницаемости, в том числе рудовмещающими, которые сложены и/или обрамляются наиболее измененными породами, определяет масштабы и частоту чередования минералого-петрохимических зон в поперечных разрезах ореолов. В этих случаях нарушается одноразовая смена минералого-петрохимических зон, но имеет место неоднократное повторение их в разных сочетаниях.

Обобщенная схема минеральной зональности околорудных метасоматических ореолов (колонок) включает следующие новообразованные минералы, в объеме каждой минералого-петрохимической зоны объединяемые в несколько парагенезисов (подчеркнуты минералы, исчезающие в более тыловых зонах).

Таблица 2. Порядок минеральной зональности околорудных метасоматических ореолов (колонок) мезотермальных месторождений золота

Table 2. Order of mineral zoning of near-ore metasomatic haloes (columns) of gold mesothermal deposits

| | |
|---|--|
| Фронтальная зона Frontal zone | Кварц+серицит+лейкоксен+рутил+магнетит±пирит±кальцит+альбит±кероген±хлориты±цоизит±актинолит±тремолит Quartz+sericite+leucoxene+rutile+magnetic iron oxide±pyrite±calcite+ albite±kerogen±chlorites±zoisite±actinolite±tremolite |
| Хлоритовая (эпидотовая, эпидот-хлоритовая) зона Chloritic (epidotic, epidote-chloritic) zone | Кварц+серицит+лейкоксен+рутил+магнетит+пирит±кальцит±доломит±сульфиды±золото, серебро+альбит±кероген±хлориты±цоизит±клиноцоизит±эпидот Quartz+sericite+leucoxene+rutile+magnetic iron oxide+pyrite±calcite± dolomite± sulphides±gold, silver+albite± kerogen± chlorites±zoisite± clinozoisite±epidote |
| Альбитовая зона Albitic zone | Кварц+серицит+лейкоксен+рутил+магнетит+пирит±кальцит±доломит-анкерит±сидерит±апатит±сульфиды±золото, серебро±кероген+альбит Quartz+sericite+leucoxene+rutile+magnetic iron oxide+pyrite±calcite± dolomite-ankerite±siderite±apatite±sulphides± gold, silver±kerogen+albite |
| Тыловая зона Rear zone | Кварц+серицит+лейкоксен+рутил+магнетит+пирит±кальцит±анкерит±сидерит±брейнерит±апатит±сульфиды±золото, серебро±кероген Quartz+sericite+leucoxene+rutile+magnetic iron oxide+pyrite±calcite± ankerite±siderite± breunnerite±apatite±sulphides± gold, silver±kerogen |

Примечание. Подчеркнуты минералы, исчезающие в более тыловой зоне.

Note. The minerals, disappearing in more rear zone are underlined.

В составе всего ансамбля новообразованных минералов участвуют «сквозные» минералы, присутствующие во всех минералого-петрохимических зонах, и те, которые исчезают в смежных более тыловых зонах. Границы между минералого-петрохимическими зонами бывают резкими (нитевидными) и постепенными. В последнем случае в более тыловой зоне на расстояниях до нескольких ... многих мм от границы массового исчезновения минерала еще сохраняются его редкие реликты.

В породах периферийных минералого-петрохимических зон ореолов, как правило, сохраняются свойственные исходным породам текстуры и структуры, во фронтальной зоне – в большей степени, в хлоритовой – в меньшей. Во внутренних альбитовой и березитовой зонах породы, в том числе апосланцевые метасоматиты, преобретают массивное сложение, лепидогранобластовую, гранолепидобластовую, лепидобластовую, порфиробластовую структуры.

Переход от фронтальной к смежной, более тыловой зоне на глубоких горизонтах выражается в полном растворении актинолита или тремолита, а при их отсутствии на верхних – одного-двух цветных минералов исходных пород, которые среди других минералов наиболее чувствительны к изменениям и по единичным наблюдениям растворяются одновременно с актинолитом или тремолитом. В числе замещающих эти минералы ассоциаций участвуют хлориты (брунсвит, делафоссит, рипидолит), чешуйки которых «загрязнены» скоплениями лейкоксена, рутила, образованных за счет титана, высвобождаемого при растворении исходных цветных минералов, и иногда образующих сагенитовую решетку. При дальнейшем замещении хлорита мусковитом в последнем скопления титановых минералов сохраняются, и по этому признаку метасоматический мусковит отличается от мусковита, образованного на этапе предшествующего регионального метаморфизма. Пластинки метаморфического мусковита чисты в архейских и позднепалеозойских ультраметаморфитах – альмандин-двуслюдяных парагнейсах, и в углеродистых терригенных сланцах позднерифейских кедровской, водораздельной, мухтунной, холмхинской, имняхской, аунакитской, вачской, догалдынской, раннепротерозойской михайловской свит.

Минералы эпидотовой группы, как и хлориты, участвующие в составе пород фронтальной зоны как незначительная примесь и не всегда, в смежной, более тыловой зоне в некоторых породах получают максимальное развитие, причем масса их в ореолах лавинообразно нарастает к внутренней границе зоны и эпидот при этом замещает доизит и клиноцоизит. Цоизит предпочтительно образуется за счет основных плагиоклазов, развиваясь в них первоначально в виде «оспелых» выделений. При участии в породах хлоритов и минералов эпидотовой группы последние исчезают в направлении к

более тыловой альбитовой зоне несколько раньше, чем хлориты, но обычно не далее, чем в нескольких сантиметрах от границы зон.

Типоморфный минерал альбитовой зоны альбит образуется вследствие деанортизации исходных плагиоклазов – слабой, в виде периферийных каемок, во фронтальной и почти полной – в альбитовой зонах.

Тыловая зона лишена альбита и сложена «сквозными» минералами, свойственными всему ореолу, масса которых возрастает от незначительной примеси на периферии до полного преобладания в этой зоне. К их числу относятся кварц, серицит и мусковит, карбонаты, пирит, лейкоксен и рутил, магнетит. Содержание кварца варьирует от единичных зерен в лиственитах, образованных за счет малокремнистых пород (кальцифиров и других), до десятков ... многих десятков об. % в большинстве метасоматитов.

Разнообразные по составу карбонаты подчиняются в ореолах единым для всех, в том числе изначально бескарбонатных, пород и для всех изученных месторождений закономерностям.

Во-первых, общая их масса прогрессивно нарастает в направлении к рудовмещающим зонам при постепенном одновременном укрупнении индивидов-ромбоздров до многих мм в поперечнике. При значительных объемах подвергшихся метасоматизму пород, например в Ленском районе, ареалы карбонатизации образуют в том числе и узкие лентовидные зоны, вытягивающиеся вдоль секущих складчатость разломных рудоносных структур [23, 24].

Во-вторых, состав карбонатов усложняется во внутренних и рудных зонах, сравнительно с периферией ореолов, а также во времени – от существенно известковых (кальцит) до железо-магнезиальных, преобладающих среди поздних новообразований.

Кероген в черных сланцах кедровской, водораздельной, мухтунной свит диагностирован как графит с незначительной долей (до 20 мас. %) неграфитизированной субстанции и с примесью битумоидов до 0,009 мас. %, в составе которых 60 мас. % приходится на углеводороды и 40 мас. % – на легкие смолы с преобладанием в последних кислот и эфиров. Прожилки мощностью до 2 см, секущие черные сланцы михайловской свиты в месторождении Чертово Кюрыто, сложены аморфным углеродистым веществом состава от антрацита до кокса.

Содержание керогена снижается во внутренних (альбитовой, березитовой) зонах вплоть до полного его исчезновения в апочерносланцевых осветленных до серого и белого цветов метасоматитах. Однако известны случаи (в Иркиндинском месторождении) заполнения тонкой «сыпью» графита былых кристаллов кальцита в апокальцифировых лиственитах, вследствие чего последние приобретают черный цвет.

В околорудном апосланцевом метасоматическом ореоле месторождения Чертово Кюрыто, в отличие от других участвующих в исследовании месторождений, кероген удален и из части объема промежуточной хлоритовой зоны, смежной с более тыловой также без керогена альбитовой зоной. Лишенные керогена осветленные до зеленовато-серого цвета породы, как обычно, утратили сланцевую, слойчатую текстуры, цементно-обломочную структуру, которые преобразованы, соответственно, в массивную и лепидогранобластовую, свойственные метасоматитам внутренних зон. Усиление интенсивности изменений пород сопровождалось существенными преобразованиями их химических составов (табл. 3). По перечисленным обстоятельствам типовая хлоритовая зона модели разделена на углеродистую, аутентичную хлоритовой с керогеном зоне апосланцевых околорудных метасоматических ореолов других месторождений, и собственно хлоритовую (без керогена).

Исследование рудовмещающего субстрата в соседних Сухоложском и Вернинском месторождениях в сравнительном аспекте с петролого-геохимической моделью околорудных метасоматических ореолов обеспечило идентификацию гидротермально измененных черных сланцев позднерифейских хомолхинской, имняхской (Сухой Лог), аунакитской (Вернинское месторождение) свит с многократно чередующимися в поперечных разрезах апосланцевых ореолов внутренними (альбитовой, тыловой – березитовой), на Западном участке Сухого Лога – с промежуточной хлоритовой и смежной альбитовой минералого-петрохимическими зонами [23, 24]. В обоих месторождениях крупнообъемные рудные залежи и минерализованные зоны прожилково-вкрапленных руд приурочены к упомянутым внутренним зонам, которые обрамлены более крупнообъемными безрудными хлоритовой и фронтальной минералого-петрохимическими зонами пропилиноподобных изменений, как правило, расположенными за пределами разведочных полигонов и не вскрытыми скважинами, вследствие чего недоступными для систематического опробования вне выветрелых (на поверхности) пород.

Увеличение массы сульфидов в породах хлоритовой, альбитовой, березитовой зон синхронно с усилением степени их преобразований с трансформацией цементно-обломочной структуры сравнительно слабо гидротермально измененных на этапах регионального метаморфизма нагревания и околорудного метасоматизма во фронтальной зоне бессульфидных сланцев в лепидогранобластовую структуру сульфидизированных апосланцевых метасоматитов.

Петрохимические черты околорудных метасоматических ореолов

Ведущие черты преобразований химических составов пород в обсуждаемых (табл. 3) и [23–26]

мезотермальных золоторудных месторождениях заключаются в почти полной замене в тыловой зоне ореолов относительно слабого основания натрия более сильным основанием калием, в частичном (до 50 мас. %) выносе из тыловых зон кремния, но поступлении в ореолы, преимущественно в их внутренние зоны, и фиксации значительных масс углекислоты, серы, отчасти калия. Эти изменения химического и минерального составов разных пород, повторяющиеся в мезотермальных золоторудных месторождениях мира, первоначально описаны в мировой литературе столетие назад и в дальнейшем приобрели статус типовых. Метасоматиты тыловой зоны ореолов, образованные в этих месторождениях в результате минералого-химических преобразований пород, в СССР получили название «березиты», в США – «вирджиниты». Тогда же было показано сочетание в объеме одного метасоматического ореола (метасоматической колонки) березита в тыловой зоне и пропилита в периферийных.

К числу типовых петрохимических черт пропилит-березитового процесса относится также отсутствие, как правило, признаков существенного удаления или поступления вещества на периферии ореолов, то есть во фронтальной и отчасти хлоритовой (эпидотовой, эпидот-хлоритовой) зонах, что согласуется с экспериментальными данными [27]. На примере обсуждаемых месторождений (табл. 3) видно, что величина удельной массы перемещенного вещества здесь, аккумулирующая в себе и фактор изначальной неравномерности распределения петрогенных элементов, даже в полосчатых парагнейсах с весьма неравномерным их распределением не превышает нескольких (до 10, редко 15) процентов. Большая часть минеральных новообразований в этих зонах формируется, очевидно, посредством перераспределения компонентов между замещаемыми и замещающими фазами. Вместе с тем в некоторых колонках (I, IV, V, VII, XI, XVI, XVIII, XIX–XXI) изменения химических составов исходных пород при метасоматизме значительны.

Судя по балансу масс петрогенных компонентов в ореолах и величине удельной массы перемещенного вещества, достигающей 50 мас. %, активная миграция их свойственна в основном внутренним зонам ореолов. В контрастных по химическому составу средах во всех, но особенно во внутренних зонах формирующихся околорудных метасоматических ореолов, происходит перемещение петрогенных элементов согласно градиентам их концентраций, доказывающее концентрационно-диффузионный механизм массопереноса в процессах околотрецинного (околоразломного) гидротермального метасоматизма [28].

Во внутренних зонах березит-пропилитовых колонок, в том числе апочерносланцевых, в ближайшем обрамлении (до 1,5 км) глубинных разломов формируются контрастные аномалии, помимо упомянутых элементов триады, других фемофиль-

Таблица 3. Коэффициенты распределения (КР) (выноса <1, привноса >1) петрогенных элементов в минералого-петрохимических зонах околорудных метасоматических ореолов гидротермальных золоторудных месторождений юго-восточного складчатого обрамления Сибирского кратона

Table 3. Coefficients of distribution (CD) (carry out <1, addition >1) of petrogenic elements in mineral-petrochemic zones of near-ore metasomatic haloes of hydrothermal gold deposits in South-East folded frame of Siberian craton

| Минералого-петрохимические зоны и подзоны (число проб) Mineral-Petrochemic zones and subzones (number of samples) | Химические элементы/Chemical elements | | | | | | | | | | | | | | | Δ |
|--|---------------------------------------|-----|------------|------------|-------------|------------------|------------|------------|------------------|------------------|------------|------------|------------|----------------|-----|------|
| | Si | Al | K | Na | S* | С _{кб.} | Ca | Mg | Fe ²⁺ | Fe ³⁺ | Ti | Mn | P | H ⁺ | O | |
| Кристаллический (несланцевый) субстрат/Crystal (non-shale) substratum | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Ирокиндинское месторождение/Irokindinskoe deposit</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>I. Альмандин-диопсид-двуполевошпатовые парагнейсы (AR, 9 проб)</i> <i>I. Almandine-diopside-two-feldspathic paragneisses (AR, 9 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ФУ (23) | 1,1 | 1,1 | 1,7 | 1,3 | 3,8 | 0,8 | 0,7 | 1,0 | 1,2 | 0,9 | 1,1 | 1,0 | 1,1 | 1,3 | 1,0 | 8,0 |
| ФИ (14) | 1,1 | 1,1 | 1,7 | 1,2 | 2,1 | 0,7 | 0,6 | 1,0 | 1,1 | 1,0 | 1,1 | 0,8 | 1,4 | 2,3 | 1,0 | 11,2 |
| Х (11) | 1,0 | 1,0 | 2,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 0,4 | 1,5 | 1,2 | 0,6 | 1,1 | 0,6 | 0,9 | 3,7 | 1,0 | 13,9 |
| А (10) | 0,9 | 1,1 | 3,4 | 1,3 | 8,1 | 2,0 | 0,4 | 0,9 | 1,4 | 0,6 | 1,5 | 0,7 | 0,9 | 3,3 | 1,0 | 17,2 |
| Т (26) | 0,9 | 1,1 | 4,1 | 0,2 | 14,9 | 2,4 | 0,5 | 1,4 | 1,5 | 0,7 | 1,6 | 0,8 | 1,1 | 3,9 | 1,0 | 20,2 |
| <i>II. Альмандин-двуслюдяные парагнейсы (AR, 14 проб)/II. Almandine-two-mica paragneisses (AR, 14 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ФУ (9) | 0,9 | 1,1 | 1,1 | 0,9 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,5 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,5 | 1,4 | 1,6 | 1,0 | 5,6 |
| ФИ (11) | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 1,4 | 0,7 | 1,2 | 1,0 | 1,4 | 1,2 | 1,1 | 0,8 | 2,5 | 1,0 | 4,0 |
| Х (7) | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,7 | 2,2 | 4,0 | 0,9 | 1,2 | 1,0 | 1,5 | 1,2 | 1,1 | 0,9 | 2,3 | 1,0 | 5,3 |
| А (6) | 0,8 | 1,0 | 1,4 | 0,5 | 4,1 | 19 | 1,2 | 1,4 | 1,1 | 0,9 | 1,3 | 1,1 | 1,0 | 2,3 | 1,0 | 12,6 |
| Т (7) | 0,9 | 1,0 | 1,7 | 0,1 | 37 | 16 | 1,0 | 1,1 | 0,7 | 1,6 | 1,0 | 1,6 | 0,9 | 1,9 | 1,0 | 13,8 |
| <i>III. Кальцифиры (AR, 6 проб)/III. Calciphyres (AR, 6 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ФУ (13) | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,2 | 1,5 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,2 | 0,7 | 1,0 | 1,8 | 1,1 | 0,9 | 1,0 | 2,9 |
| ФИ (7) | 1,0 | 1,0 | 1,3 | 1,0 | 5,5 | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 0,9 | 0,6 | 1,1 | 1,3 | 1,2 | 3,0 | 1,0 | 4,8 |
| Х (6) | 0,7 | 0,8 | 1,0 | 0,6 | 3,5 | 1,4 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,7 | 1,0 | 0,8 | 1,1 | 1,6 | 1,0 | 9,5 |
| А (8) | 1,0 | 1,1 | 1,6 | 1,2 | 4,4 | 1,1 | 0,7 | 1,3 | 1,3 | 0,5 | 1,3 | 1,4 | 1,3 | 2,3 | 1,0 | 13,7 |
| Т (18) | 1,0 | 1,3 | 3,0 | 0,3 | 22 | 1,0 | 0,5 | 1,8 | 1,8 | 0,5 | 1,8 | 1,8 | 1,9 | 4,1 | 1,0 | 19,8 |
| <i>IV. Граниты мигматитовой выплавки (AR, 7 проб)/IV. Granites of migmatitic melting (AR, 7 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ФУ (5) | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 0,2 | 2,5 | 1,1 | 1,2 | 0,9 | 1,3 | 0,8 | 0,5 | 0,8 | 3,1 | 1,0 | 1,2 |
| ФИ (6) | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,1 | 0,3 | 4,9 | 1,7 | 1,5 | 1,1 | 2,1 | 0,9 | 1,5 | 1,1 | 2,1 | 1,0 | 3,1 |
| Х (10) | 0,9 | 1,1 | 0,6 | 1,6 | 0,1 | 11 | 1,6 | 1,6 | 0,9 | 1,7 | 0,6 | 0,9 | 1,5 | 3,7 | 1,0 | 6,9 |
| А (9) | 1,0 | 1,1 | 0,8 | 1,0 | 7,6 | 17 | 1,0 | 1,7 | 1,0 | 1,6 | 1,7 | 1,6 | 3,5 | 5,2 | 1,0 | 4,5 |
| Т (8) | 0,9 | 1,1 | 1,2 | 0,1 | 20 | 51 | 2,6 | 3,3 | 1,6 | 3,6 | 3,5 | 1,7 | 7,5 | 11 | 1,1 | 18,8 |
| <i>V. Дайковые фельзитовые умеренно щелочные биотитовые микрогранит-порфиры (PZ₃, 5 проб)</i> <i>V. Dike felsitic moderately alkaline biotitic microgranite porphyry (PZ₃, 5 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Х (4) | 0,9 | 1,1 | 1,1 | 1,0 | 0,4 | 2,4 | 2,2 | 2,8 | 2,7 | 1,6 | 3,8 | 3,1 | 2,9 | 1,3 | 1,0 | 12,6 |
| А (6) | 0,7 | 1,1 | 1,7 | 0,5 | 1,2 | 4,0 | 3,4 | 4,3 | 4,3 | 1,8 | 6,0 | 4,3 | 4,1 | 2,9 | 1,0 | 27,0 |
| Т (6) | 0,7 | 1,2 | 2,6 | 0,1 | 20,1 | 4,9 | 4,5 | 4,9 | 3,1 | 5,5 | 6,2 | 4,6 | 3,3 | 1,5 | 1,0 | 36,8 |
| <i>Кедровское месторождение/Kedrovskoe deposit</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>VI. Габбро муйского комплекса (R₃, 1 проба)/VI. Gabbro of muisk complex (R₃, 1 sample)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Х (4) | 0,9 | 1,0 | 1,5 | 2,4 | 24 | 2,2 | 0,6 | 0,9 | 1,2 | 0,7 | 1,3 | 0,8 | 1,7 | 0,9 | 1,0 | 10,6 |
| А (2) | 0,9 | 1,0 | 1,9 | 1,6 | 83 | 2,7 | 0,5 | 0,6 | 1,2 | 0,8 | 1,9 | 0,9 | 1,4 | 0,4 | 1,0 | 13,2 |
| Т (2) | 0,6 | 1,1 | 2,5 | 0,5 | 77 | 5,7 | 1,1 | 1,4 | 1,7 | 1,0 | 1,3 | 1,2 | 1,9 | 0,6 | 1,0 | 22,6 |
| <i>VII. Альмандин-двуслюдяные плагиоклазовые парагнейсы Кедровской очагово-купольной постройки (PZ₃, 1 проба)</i> <i>VII. Almandine-two-mica plagioclase paragneisses of Kedrovskaya chamber-dome structure (PZ₃, 1 sample)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ФУ (1) | 1,0 | 1,0 | 1,7 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,9 | 1,1 | 1,4 | 1,4 | 0,9 | 0,7 | 2,4 | – | 1,0 | 7,0 |
| Х (1) | 1,0 | 1,1 | 1,1 | 0,8 | 2,6 | 0,7 | 1,4 | 0,5 | 1,2 | 1,4 | 1,1 | 0,6 | 1,7 | – | 1,0 | 6,0 |
| Т (1) | 0,5 | 0,5 | 1,3 | 0,1 | 22 | 14 | 8,1 | 5,4 | 1,7 | 1,6 | 2,0 | 1,4 | 7,5 | – | 1,0 | 45,0 |
| <i>VIII. Кварцевые диориты Кедровской очагово-купольной постройки (PZ₃, 6 проб)</i> <i>VIII. Quartz diorites of Kedrovskaya chamber-dome structure (PZ₃, 6 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Х (1) | 1,0 | 1,0 | 0,8 | 1,0 | 1,5 | 4,8 | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 0,7 | 1,0 | 1,1 | 0,9 | 1,5 | 1,0 | 3,0 |
| А (5) | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 8,9 | 14 | 1,0 | 0,8 | 1,0 | 0,3 | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 1,3 | 1,0 | 6,0 |
| Х (16) | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 11,1 | 10 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 1,1 | 1,0 | 1,5 | 1,0 | 4,0 |
| А (6) | 0,9 | 0,9 | 1,2 | 0,9 | 32,7 | 22 | 1,3 | 1,5 | 1,6 | 0,7 | 1,9 | 1,4 | 1,5 | 1,1 | 1,0 | 12,0 |
| Т (1) | 0,5 | 0,8 | 1,4 | 0,2 | 428 | 48 | 3,2 | 3,4 | 2,7 | 4,2 | 2,7 | 3,4 | 2,6 | 0,3 | 1,1 | 41,0 |

Продолжение табл. 3.

Table 3.

| Минералого-петрохимические зоны и подзоны (число проб) Mineral-Petrochemic zones and subzones (number of samples) | Химические элементы/Chemical elements | | | | | | | | | | | | | | | Δ |
|--|---------------------------------------|-----|------------|-----|-------------|------------------|------------|------------|------------------|------------------|------------|------------|------------|----------------|-----|------|
| | Si | Al | K | Na | S* | C _{кб.} | Ca | Mg | Fe ²⁺ | Fe ³⁺ | Ti | Mn | P | H ⁺ | O | |
| <i>IX. Дайковые кварцевые диориты Кедровской очагово-купольной постройки (PZ₃, 7 проб)</i> <i>IX. Dike quartz diorites of Kedrovskaya chamber-dome structure (PZ₃, 7 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| X (17) | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 5,4 | 9,1 | 1,0 | 0,9 | 1,1 | 0,6 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,3 | 1,0 | 4,1 |
| A (22) | 0,9 | 1,0 | 1,2 | 0,8 | 14,0 | 17 | 1,2 | 1,2 | 1,5 | 0,6 | 1,3 | 1,2 | 1,3 | 1,2 | 1,0 | 9,3 |
| T (2) | 0,7 | 0,9 | 1,5 | 0,2 | 117 | 34 | 2,4 | 2,7 | 2,4 | 1,6 | 2,1 | 2,4 | 2,3 | 1,0 | 1,0 | 29,7 |
| <i>Западное месторождение/Западное deposit</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>X. Габбро муйского комплекса (R₃, 6 проб)/X. Gabbro of muisk complex (R₃, 6 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| X (3) | 0,9 | 0,9 | 1,2 | 1,1 | 1,0 | 17 | 1,0 | 0,5 | 1,1 | 0,7 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,3 | 1,0 | 8,6 |
| A (1) | 0,9 | 0,9 | 2,6 | 1,3 | 0,7 | 31 | 0,8 | 0,4 | 1,0 | 0,2 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 14,0 |
| T (1) | 0,8 | 1,0 | 6,7 | 0,1 | 1,7 | 42 | 1,2 | 0,8 | 1,2 | 0,2 | 1,1 | 0,8 | 0,7 | 1,5 | 1,1 | 23,5 |
| <i>XI. Дайковые долериты (PZ₃, 8 проб)/XI. Dike dolerites (PZ₃, 8 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| X (9) | 0,9 | 0,9 | 2,2 | 1,0 | 0,8 | 10 | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 0,5 | 0,9 | 0,8 | 0,6 | 0,9 | 1,0 | 11,0 |
| A (2) | 0,8 | 0,9 | 5,4 | 0,5 | 1,3 | 15 | 0,8 | 0,9 | 1,1 | 0,1 | 0,9 | 0,8 | 0,6 | 1,0 | 1,1 | 20,0 |
| T (5) | 0,8 | 0,8 | 6,5 | 0,1 | 1,6 | 16 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 0,4 | 0,8 | 0,6 | 0,5 | 1,3 | 1,1 | 21,0 |
| <i>Петелинское кварцево-жильное поле/Petelinskoe quartz-vein field</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>XII. Покровные кварцевые порфиры келянской свиты (R₃, 5 проб)/XII. Cover quartz porphyry of kelyanskaya suite (R₃, 5 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| X (4) | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 2,3 | 3,0 | 0,8 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 0,9 | 1,1 | 0,9 | 0,7 | 1,0 | 3,3 |
| A* (6) | 1,1 | 1,0 | 1,1 | 0,9 | 2,4 | 4,6 | 0,6 | 0,5 | 0,8 | 0,4 | 0,9 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 1,0 | 6,8 |
| A** (3) | 0,8 | 1,1 | 2,1 | 0,5 | 3,4 | 17 | 1,7 | 2,6 | 1,8 | 0,8 | 1,3 | 1,7 | 1,6 | 1,7 | 1,0 | 20,3 |
| <i>XIII. Покровные базальтовые порфиры келянской свиты (R₃, 2 пробы)</i> <i>XIII. Cover basalt porphyrites of kelyanskaya suite (R₃, 2 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| X (4) | 0,9 | 0,9 | 1,6 | 0,9 | 2,2 | 16 | 0,7 | 0,8 | 1,0 | 0,4 | 0,9 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 1,0 | 11,1 |
| A (2) | 0,8 | 0,8 | 3,3 | 0,6 | 38 | 25 | 0,8 | 0,6 | 1,5 | 0,5 | 1,8 | 1,2 | 4,2 | 1,0 | 1,1 | 23,9 |
| T (1) | 0,6 | 0,9 | 5,2 | 0,1 | 19 | 29 | 1,4 | 0,8 | 0,9 | 0,6 | 0,8 | 0,8 | 0,5 | 2,3 | 1,1 | 29,4 |
| <i>Богодиканское месторождение/Bogodikanskoe deposit</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>XIV. Дайковые долериты (PZ₃, 16 проб)/XIV. Dike dolerites (PZ₃, 16 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| X (4) | 0,9 | 0,9 | 1,3 | 0,8 | 0,8 | 29 | 0,8 | 1,1 | 0,9 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 0,7 | 1,3 | 1,0 | 12,5 |
| A (1) | 0,8 | 0,7 | 2,2 | 0,6 | 0,6 | 51 | 0,8 | 0,9 | 1,1 | 0,3 | 0,9 | 1,0 | 0,8 | 0,7 | 1,1 | 20,7 |
| T (2) | 0,8 | 0,9 | 3,1 | 0,1 | 0,9 | 42 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 0,3 | 0,7 | 0,8 | 0,6 | 1,4 | 1,1 | 19,3 |
| <i>Верхне-Сакуканское месторождение/Verkhne-Sakukanskoe deposit</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>XV. Кварцевые диориты и кварцевые монзониты кодарского комплекса (PR₁, 6 проб)</i> <i>XV. Quartz diorites and quartz monzonites of kodar complex (PR₁, 6 samples)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ФУ (5) | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 0,8 | 1,4 | 6,1 | 0,8 | 1,1 | 1,1 | 1,2 | 1,1 | 1,1 | 1,0 | 1,4 | 1,0 | 3,7 |
| X (1) | 1,0 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 3,2 | 19 | 0,9 | 1,0 | 0,9 | 0,6 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,7 | 1,0 | 6,0 |
| A (4) | 0,9 | 1,0 | 1,4 | 0,6 | 1,7 | 32 | 1,2 | 1,3 | 0,8 | 0,9 | 1,1 | 1,3 | 1,0 | 1,6 | 1,0 | 9,6 |
| T (1) | 0,8 | 0,9 | 1,1 | 0,1 | 3,4 | 79 | 2,0 | 5,2 | 1,2 | 0,7 | 0,8 | 2,7 | 0,9 | 2,2 | 1,1 | 26,6 |
| Регионально-метаморфизованные углеродистые терригенные сланцевые толщи Regional metamorphosed carbonaceous terrigenous slates terranes <i>Кедровское месторождение/Kedrovskoe deposit</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>XVI. Углеродистые мусковит-биотитовые полевошпат-кварцевые песчано-алевро-сланцы кедровской свиты (R₃, 10 проб), залежь метасоматитов типа «слоеного пирога», мощность 220 м</i> <i>XVI. Carbonaceous muscovite-biotitic feldspar-quartz sandstone-aleuro-slates of kedrovskaya suite (R₃, 10 samples), lode of metasomatites, thickness 220 m</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ФИ (4) | 1,0 | 1,1 | 1,3 | 0,8 | – | 1,9 | 0,9 | 1,5 | 1,4 | 1,5 | 1,1 | 0,9 | 1,2 | 1,3 | 1,0 | 6,2 |
| X (51) | 0,9 | 1,0 | 0,9 | 0,7 | 62 | 8,7 | 1,9 | 1,8 | 1,5 | 1,0 | 1,2 | 1,7 | 0,6 | 1,9 | 1,0 | 8,1 |
| A (73) | 1,0 | 1,0 | 1,1 | 0,8 | 67 | 13 | 1,9 | 1,0 | 1,3 | 0,7 | 1,0 | 1,5 | 0,4 | 1,3 | 1,0 | 6,6 |
| T (8) | 0,9 | 1,0 | 1,5 | 0,1 | 128 | 20 | 3,4 | 1,9 | 1,3 | 1,0 | 1,4 | 1,8 | 1,3 | 1,9 | 1,0 | 16,2 |

Окончание табл. 3.

Table 3.

| Минералого-петрохимические зоны и подзоны (число проб) Mineral-Petrochemic zones and subzones (number of samples) | Химические элементы/Chemical elements | | | | | | | | | | | | | | | Δ |
|--|---------------------------------------|-----|------------|------------|------------|------------------|------------|------------|------------------|------------------|------------|------------|------------|----------------|-----|------|
| | Si | Al | K | Na | S* | C _{кб.} | Ca | Mg | Fe ²⁺ | Fe ³⁺ | Ti | Mn | P | H ⁺ | O | |
| XVII. Углеродистые мусковит-биотитовые полевошпат-кварцевые песчано-алевро-сланцы кедровской свиты (R ₃ , 1 проба), ореол в обрамлении золотоносной кварцевой жилы XVII. Carbonaceous muscovite-biotitic feldspar-quartz sandstone-aleuro-slates of kedrovskaya suite (R ₃ , 1 sample), the haloes in the frame of gold-bearing quartz vein | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A (1) | 0,8 | 1,0 | 3,5 | 0,7 | + | 20 | 1,3 | 12 | 3,8 | 4,4 | 1,8 | 4,7 | 4,0 | 6,6 | 1,0 | 18,0 |
| T (1) | 0,6 | 1,1 | 5,5 | 0,1 | + | 70 | 9,8 | 19 | 5,5 | 2,3 | 1,7 | 4,5 | 7,7 | 15 | 1,0 | 43,0 |
| Каралонское месторождение/Karalonskoe deposit | | | | | | | | | | | | | | | | |
| XVIII. Углеродистые мусковит-биотитовые полевошпат-кварцевые песчано-алевро-сланцы водораздельной свиты (R ₃ , 2 пробы) XVIII. Carbonaceous muscovite-biotitic feldspar-quartz sandstone-aleuro-slates of vodorazdelnaya suite (R ₃ , 2 samples) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ФИ (8) | 0,8 | 1,0 | 0,7 | 0,8 | 2,1 | 4,5 | 3,2 | 4,0 | 2,2 | 1,9 | 1,4 | 2,2 | 0,7 | 1,2 | 1,0 | 17,9 |
| X* (7) | 0,7 | 1,0 | 1,2 | 0,5 | 2,7 | 8,2 | 3,8 | 3,7 | 3,0 | 1,6 | 1,5 | 3,2 | 0,3 | 1,0 | 1,0 | 24,8 |
| X** (6) | 0,7 | 1,1 | 1,2 | 0,5 | 6,5 | 7,4 | 3,4 | 3,7 | 3,1 | 2,0 | 1,8 | 3,0 | 0,3 | 1,6 | 1,0 | 26,4 |
| T (3) | 0,9 | 1,1 | 2,2 | 0,1 | 44 | 3,9 | 1,7 | 2,7 | 2,6 | 1,0 | 1,6 | 1,0 | 0,3 | 1,7 | 1,0 | 20,5 |
| Месторождение Чертово Корыто/Chertovo Koryto deposit | | | | | | | | | | | | | | | | |
| XIX. Углеродистые мусковит-биотитовые полевошпат-кварцевые крупнозернистые алевро-сланцы михайловской свиты (PR ₁ , 3 пробы) XIX. Carbonaceous muscovite-biotitic feldspar-quartz big-grain sandstone-slates of mikhaylovskaya suite (PR ₁ , 3 samples) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| У (2) | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,7 | 0,9 | 1,5 | 1,2 | 1,0 | 1,3 | 1,1 | 1,0 | 1,0 | – | 1,0 | 2,9 |
| X (8) | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,3 | 2,2 | 15 | 13 | 2,0 | 1,7 | 1,1 | 6,4 | 6,6 | 9,4 | – | 1,1 | 29,7 |
| T (1) | 0,6 | 0,7 | 0,9 | 0,1 | 1,0 | 29 | 20 | 2,7 | 1,3 | 0,1 | 6,7 | 22 | 10 | – | 1,1 | 43,4 |
| XX. Углеродистые мусковит-биотитовые полевошпат-кварцевые мелкозернистые песчано-сланцы михайловской свиты (PR ₁ , 3 пробы) XX. Carbonaceous muscovite-biotitic feldspar-quartz fine-grain sandstone-slates of mikhaylovskaya suite (PR ₁ , 3 samples) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| У (1) | 1,0 | 1,0 | 0,7 | 1,8 | 2,8 | 1,4 | 1,3 | 1,1 | 1,0 | 0,8 | 1,3 | 2,0 | 0,7 | – | 1,0 | 3,5 |
| У (3) | 1,0 | 1,1 | 0,8 | 1,1 | 2,3 | 2,0 | 1,8 | 2,2 | 1,3 | 1,7 | 1,2 | 2,5 | 1,0 | – | 1,0 | 6,5 |
| X (6) | 0,6 | 1,0 | 0,8 | 0,3 | 5,3 | 20 | 15 | 4,3 | 2,6 | 1,3 | 9,2 | 19 | 9,9 | – | 1,0 | 34,9 |
| T (1) | 0,7 | 0,9 | 0,9 | 0,1 | 1,1 | 21 | 14 | 3,6 | 2,1 | 2,8 | 8,9 | 37 | 9,7 | – | 1,0 | 32,5 |
| XXI. Углеродистые мусковит-биотитовые полевошпат-кварцевые разнозернистые песчано-сланцы михайловской свиты (PR ₁ , 3 пробы) XXI. Carbonaceous muscovite-biotitic feldspar-quartz various-grain sandstone-slates of mikhaylovskaya suite (PR ₁ , 3 samples) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| У (1) | 1,0 | 1,0 | 1,7 | 0,3 | 12 | 1,1 | 0,6 | 2,1 | 1,6 | 1,9 | 1,3 | 1,0 | 0,5 | – | 1,0 | 7,9 |
| X (4) | 0,7 | 0,9 | 1,0 | 0,2 | 17 | 15 | 6,1 | 5,2 | 3,4 | 1,8 | 9,4 | 7,0 | 5,5 | – | 1,0 | 31,4 |
| T (1) | 0,5 | 0,7 | 0,9 | 0,1 | 67 | 33 | 14 | 7,9 | 3,5 | 5,9 | 5,9 | 47 | 7,4 | – | 1,0 | 55,6 |

Примечание. I–XXI – исходные породы вне и в подзоне слабого изменения фронтальной зоны. Минеральные зоны и подзоны околорудных метасоматических ореолов: ФУ, ФИ – подзоны умеренного и интенсивного изменения фронтальной зоны; У, X, А, Т – углеродистая, хлоритовая (эпидотовая, эпидот-хлоритовая), альбитовая и тыловая (березитовая, листвени́товая) зоны, * – умеренного, ** – интенсивного изменения. S* – сера сульфидная, H⁺ – водород воды H₂O⁺. Δ – удельная масса перемещенного (привнесенного и вынесенного) вещества в отношении к массе вещества исходной породы в стандартном геометрическом объеме 10000 Å³. Жирным шрифтом выделены контрастные (КР>1,5) аномалии химических элементов.

Note. I–XXI are the initial rocks outside and in subzone of weak alteration of frontal zone. Mineral zones and subzones of near-ore metasomatic haloes: ФУ, ФИ are the subzones of moderate and intensive alteration of frontal zone; У, X, А, Т are the carbonaceous, chloritic (epidotic, epidot-chloritic), albitic and rear (beresite, listvenite) zones, * – moderate, ** – intensive alteration. S* is the sulfide sulphur, H⁺ is the hydrogen of water H₂O⁺. Δ is the specific weight of the removed (added and carried out) substance in relation to the weight of the initial rock substance in standard geometric measurement 10000 Å³. Contrast (CD>1,5) anomalies of chemical elements are put in bold type.

ных элементов – фосфора, титана, магния, кальция, железа, марганца [8, 29], содержания которых, как и титана в пирите березитов, снижаются до кларковых уровней по мере удаления от глубинных разломов [29].

Все поступающие петрогенные элементы фиксируются в минералах, образованных и за счет собственных ресурсов исходных пород. Калий входит в состав серицита, восстановленный углерод – ке-

рогена, окисленный углерод, кальций, магний, железо, марганец – в основном карбонатов, отчасти хлоритов, титан – лейкоксена, рутила, фосфор – апатита. Исключение составляют сера и углерод в случаях поступления в бессульфидные и бескарбонатные породы. Оба элемента, очевидно, в силу высокой подвижности способны проникать в наиболее удаленную от раствороподводящих каналов-разломов фронтальную зону.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gold and metals enrichment in natural granitic melts during fractional crystallization / R. Mustard, T. Ulrich, V.S. Kamenetsky, T. Mernagh // *Geology*. – 2006. – V. 34. – № 2. – P. 82–88.
2. Гусев А.И. Петрология золотогенерирующего магматизма. – М.: Изд-во РАН, 2012. – 160 с.
3. The Vilalba gold district, a new discovery in the Variscan terranes of the NW Spain: a geologic, fluid inclusions and stable isotope study / Martinez-Abad, A. Sepedal, D. Arias, A. Martin-Isard // *Ore Geology Reviews*. – 2015. – V. 66. – P. 344–365.
4. Ta Nang gold deposit in the black shales of Central Vietnam / Tuan Tran Anh, I.V. Gaskov, Trong Tran Hoa, A.S. Borisenko, A.E. Izokh, Pham Thi Dung, Hoang Yu Li, Nguyen Thi Nai // *Russian Geology and Geophysics*. – 2015. – V. 56. – № 10. – P. 1414–1427.
5. Состав метасоматических минералов золоторудного месторождения Сухой Лог как критерий его генетической связи с базит-гипербазитовым магматизмом / В.Л. Русинов, О.В. Русинова, С.Е. Борисовский, Е.И. Альшвева // *Доклады РАН*. – 2006. – Т. 405. – № 5. – С. 661–665.
6. Комаров П.В., Томсон И.Н. О плюмах и их влиянии на формирование благороднометалльного оруденения в углеродсодержащих породах // *Доклады РАН*. – 2007. – Т. 415. – № 6. – С. 779–781.
7. Carbon isotope studies of auriferous quartz carbonate veins from two orogenic gold deposits from the Neoproterozoic Chitradurga schist belt, Dharwar craton, India: evidence for mantle magmatic source of auriferous fluid / S. Sarangi, A. Sarkar, R. Srinivasan, S.C. Patel // *J. Asian Earth Sci.* – 2012. – V. 52. – P. 1–11.
8. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu. Femophilic elements in wall-rock metasomatites and in ores of mesothermal gold deposits – newsletter of mantle deep // *International Journal of Applied and Fundamental Research*. – 2011. – № 1. – P. 37–43.
9. Kucherenko I.V., Zhang Yuxuan. Metallogenic problems of hydrothermal gold deposit formation: facts and arguments // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2015. – V. 24. URL: http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012024/pdf/1755-1315_24_1_012024.pdf (дата обращения: 10.03.2016).
10. Буряк В.А., Хмельевская Н.М. Сухой Лог – одно из крупнейших золоторудных месторождений мира. – Владивосток: Дальнаука, 1997. – 156 с.
11. Goldberg J.S., Abramson G., Los V.L. Depletion and enrichment of exploration for mineral deposits // *Geochemistry Exploration, Environment Analysis*. – 2003. – V. 3. – P. 281–293.
12. Metallogeny of gold deposits of China / Shao Jun, Hui De-feng, Kong Xiang-min, Shou Nai-wu // *Geology and Resources*. – 2004. – V. 13. – № 4. – P. 246–250.
13. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena gold province, Russia / R.R. Large, V.V. Maslennikov, R. Francois, L.V. Danyushevsky, Chang Zhao Shan // *Economic Geology*. – 2007. – V. 102. – № 7. – P. 1233–1267.
14. Age and pyrite-Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log Sediment-hosted gold deposit, Russia / S. Meffre, R.R. Large, R. Scott, J. Woodhead, Z. Chang, S.E. Gilbert, L.V. Danyushevsky, V. Maslennikov, J.M. Hergt // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. – 2008. – V. 72. – P. 2377–2391.
15. Кряжев С.Г., Устинов В.И., Гриненко В.А. Особенности флюидного режима формирования золоторудного месторождения Сухой Лог по изотопно-геохимическим данным // *Геохимия*. – 2009. – № 10. – С. 1108–1117.
16. Изотопный состав свинца по данным высокоточного ICP MS-метода и источники вещества крупномасштабного благороднометалльного месторождения Сухой Лог (Россия) / И.В. Чернышов, А.В. Чугаев, Ю.Г. Сафонов, М.Р. Сароян, М.А. Юдовская, А.В. Еремина // *Геология рудных месторождений*. – 2009. – Т. 51. – № 6. – С. 550–559.
17. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb-изотопного SHRIMP-датирования акцессорных минералов / М.А. Юдовская, В.В. Дистлер, Н.В. Родионов, А.В. Мох, А.В. Антонов, С.А. Сергеев // *Геология рудных месторождений*. – 2011. – Т. 53. – № 1. – С. 32–64.
18. The noble metal distribution in the black shales of the Degdekan Gold Deposit in Northeast Russia / A.I. Khanchuk, L.P. Plyusnina, E.M. Nikitenko, T.B. Kurmina, N.N. Barinov // *Russia Journal of Pacific Geology*. – 2011. – V. 5. – № 2. – P. 89–96.
19. Gold mineralization in Proterozoic black shales: example from the Haoyaoerhudong gold deposit, northern margin of the North China Craton / Wang Jianping, Liu Jiajun, Peno Runmin, Liu Zhenjiang, Zhao Baisheng, Li Zan, Wang Yufeng, Lui Chonghao // *Ore Geology Reviews*. – 2014. – V. 63. – P. 150–159.
20. Synsedimentary to early diagenetic gold in black shale-hosted pyrite nodules at the Golden Mile Deposit, Kalgoorlie, Western Australia / J.A. Steadman, R.R. Large, S. Meffre, P.H. Olin, L.V. Danyushevsky, D.D. Gregory, I. Belousov, E. Lounejeva, T.R. Ireland, P. Holden // *Economic Geology*. – 2015. – V. 110. – № 5. – P. 1157–1191.
21. Геодинамические условия формирования золоторудных месторождений Бодайбинского неопротерозойского прогиба / М.И. Кузьмин, В.В. Ярмолук, А.И. Спиридонов, В.К. Немеров, А.И. Иванов, Г.Л. Митрофанов // *Доклады РАН*. – 2006. – Т. 407. – № 6. – С. 793–797.
22. Этапы формирования крупномасштабной благороднометалльной минерализации месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь): результаты изотопно-геохронологического изучения / Н.П. Лаверов, И.В. Чернышов, А.В. Чугаев, Э.Д. Баирова, Ю.В. Гольцман, В.В. Дистлер, М.А. Юдовская // *Доклады РАН*. – 2007. – Т. 415. – № 2. – С. 236–241.
23. Петролого-геохимические черты околорудного метасоматизма в золоторудном месторождении Сухой Лог (Ленский район). Ч. 2. Петрология околорудного метасоматизма / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верхозин // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012а. – Т. 320. – № 1. – С. 28–37.
24. Петролого-геохимические черты околорудного метасоматизма в Вернинском золоторудном месторождении (Ленский район) /

- И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верхошин // Известия Томского политехнического университета. – 2012б. – Т. 321. – № 1. – С. 22–33.
25. Cherkasova T., Kucherenko I., Abramova R. Rear polymineral zone of near-veined metasomatic aureole in mesothermal Zun-Holba gold deposit (Eastern Sayan) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 27. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012003/pdf>. (дата обращения: 10.03.2016).
26. Kucherenko I., Zhang Yuxuan, Abramova R. Mineral-petrochemical wallrock alteration of rocks in Bericul gold-ore deposit (Kuznetsk Alatau) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 27. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012006/pdf> (дата обращения: 10.03.2016).
27. Зарайский Г.П. Зональность и условия образования метасоматических пород. – М.: Наука, 1989. – 349 с.
28. Кучеренко И.В. Гидродинамика трещинно-поровых флюидно-породных взаимодействий и механизм массопереноса в процессах околотрещинного гидротермального метасоматизма // Разведка и охрана недр. – 2010. – № 11. – С. 37–43.
29. Кучеренко И.В. О фосфор-магний-титановой специализации золотоносных березитов // Доклады АН СССР. – 1987. – Т. 293. – № 2. – С. 443–447.

Поступила 15.02.2016 г.

Информация об авторах

Кучеренко И.В., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 553.411.071.242.4+550.4

PETROLOGIC AND GEOCHEMIC FEATURES OF THE ORE-CONTAINING SUBSTRATUM IN HYDROTHERMAL GOLD DEPOSITS. PART 1. PETROLOGY OF THE NEAR-ORE METASOMATISM

Igor V. Kucherenko,

kivr@tpu.ru

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

The relevance of the research is caused by the necessity to correct and elaborate on geological (metallogenical) component of the hydrothermal gold deposits formation theory within the framework of which the conflicting ideas about ore-formation geological making (energy and metalliferous fluids sources) go in four competing hypotheses eliminating one other. Therefore it is impossible to develop a complex of effective forecast-search mineralization criteria.

The main aim of the study is to prove the belonging epigenetic mineral associations at the ore-formation stage in near-ore altering black shales series to metasomatic formations, contrary to the wide-spread ideas, and, as consequence, material-genetic similarity of apoblackshales zoning metasomatic columns (haloes) with those, formed in non-shale (crystalline) substratum; external (non-rock) sources of gold and other metals, concentrated in deposits formed in black shales series.

The methods used in the study: 1) formation of geological cross sections of near-ore metasomatic haloes (columns) with selection of multipurpose samples (mass 1,5–2,0 kg); 2) preparation of samples for analysis in licensing laboratories; 3) diagnosis up to a species of minerals chemical compositions using optical and electron microscopes; 4) complete chemical silicate analysis of rocks samples; 5) atom-absorption (sensitivity $1 \cdot 10^{-8}$ wt. % for gold, silver, $5 \cdot 10^{-7}$ wt. % for mercury), controlling neutron-stimulate, chemical-spectrum analysis for gold (sensitivity $1 \cdot 10^{-8}$ and $3 \cdot 10^{-8}$ wt. % accordingly); 6) petrochemical conversions of the results of complete chemical silicate rock analysis in volume-atomic method; 7) balance calculations of petrogenic chemical elements migration in near-ore metasomatic columns; 8) calculations of statistical parameters of metal distribution and balance in near-ore expanse of deposits using two-level system of selections, to ensure reconstruction of chemical elements geological history and proper appraisal of donor potential of the rocks including black shales.

The results. In sixteen gold-ore deposits of south mountain-folded frame of Siberian craton two-, three-stage history of formation of non-shale and black-shale ore-bearing substratum was reconstructed and common petrologic-geochemical model of near-ore zone metasomatic haloes (columns) was developed. The haloes represent a combination of beresitic and propylitic formations in inside, intermediate chloritic and frontal zones accordingly. Polymetal composition of rear (beresite) zone, different from two-component (quartz, sericite) composition of the theoretical model (D.S. Korzhinsky), is formed in rock–fluid system, opened to carry out (Na, Si) and addition of components coming with metalliferous fluids from outside and fixed into own mineral new-formations and as trace elements mainly in inside zones. According to balance calculations potassium (sericite), reduced sulphur (sulphides), oxidized (carbonates) and reduced (kerogen, hydrocarbons) carbon, oregonous (Au, Ag, As, Hg and other) and petrogenous elements including femic Ti, P, Mg, Fe, Ca, Mn come into haloes and ores. The contrast of anomalies reaches many hundreds and thousands per cents. Ti and P form their own mineral phases – rutile, leucoxene, apatite, Mg, Fe, Ca Mn form a part of carbonates, other metals are concentrated in proper minerals and admixtures. Distribution of gold and accompanying metals in near-ore space is subject to metasomatic zoning – near-ore geochemical haloes always take up lesser volumes comparatively with the near-ore metasomatic ones. It is expressed in subclark contents (0,5–1,2 mg/t) and low distribution dispersion of gold, silver, mercury in various rocks, including black shales regionally metamorphosed on muscovite-biotite paragenesis level outside and in weak alteration subzone of frontal zone of near-ore metasomatic haloes, and in sequential increase of these parameters, as well as Au-Ag-relation and correlative connections between gold and silver from one mineral-petrochemical zone to another at intensification of near-ore metasomatic rocks alterations with achievement of maximum quantities in rear zone the more the higher metal contents in ores. The results obtained prove the material-genetic similarity of derivatives of ore-formation processes in non-shale and black-shale substratum and sinore origin of contrasting geochemical anomalies (their beyond-clark contents) in near-ore mesothermal gold deposits space. The first part of the paper introduces the results of study of near-ore metasomatic haloes (columns). The second part introduces the results of the study of oregonous (Au, Ag, Hg) elements distribution in near-ore space, the petrologic-geochemical materials are discussed and the conclusions are stated.

Key words:

Hydrothermal gold deposits, crystalline (non-shale) substratum, black shales, near-ore (ore-containing) zoned metasomatic, geochemical haloes.

REFERENCES

1. Mustard R., Ulrich T., Kamenetsky V.S., Mernagh T. Gold and metals enrichment in natural granitic melts during fractional crystallization. *Geology*, 2006, vol. 34, no. 2, pp. 82–88.
2. Gusev A.I. *Petrologiya zolotogeneriruyushchego magmatizma* [Petrology of the gold-generating magmatism]. Moscow, RAE Press, 2012. 160 p.
3. Martinez-Abad, Sepedal A., Arias D., Martin-Isard A. The Vilalba gold district, a new discovery in the Variscan terranes of the NW Spain: a geologic, fluid inclusions and stable isotope study. *Ore Geology Reviews*, 2015, vol. 66, pp. 344–365.
4. Anh Tuan Tran, Gaskov I.V., Hoa Trong Tran, Borisenko A.S., Izokh A.E., Dung Pham Thi, Li Hoang Yu, Nai Nguyen Thi. Ta Nang gold deposit in the black shales of Central Vietnam. *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, no. 10, pp. 1414–1427.
5. Rusinov V.L., Rusinova O.V., Borisovskiy S.E., Alysheva E.I. Metasomatic minerals composition of Sukhoi Log gold-ore deposit as a criterion of its genetic relation to basite-ultrabasic magmatism. *Doklady RAN*, 2006, vol. 405, no. 5, pp. 661–665. In Rus.
6. Komarov P.V., Tomson I.N. On plums and their influence on formation of precious metals mineralization in carbon-containing rocks. *Doklady RAN*, 2007, vol. 415, no. 6, pp. 779–781. In Rus.

7. Sarangi S., Sarkar A., Srinivasan R., Patel S.C. Carbon isotope studies of auriferous quartz carbonate veins from two orogenic gold deposits from the Neoproterozoic Chitradurga schist belt, Dharwar craton, India: Evidence for mantle magmatic source of auriferous fluid. *J. Asian Earth Sci.*, 2012, vol. 52, pp. 1–11.
8. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu. Femophilic elements in wall-rock metasomatites and in ores of mesothermal gold deposits – newsletter of mantle deep. *International Journal of applied and fundamental research*, 2011, no. 1, pp. 37–43.
9. Kucherenko I.V., Zhang Yuxuan. Metallogenic problems of hydrothermal gold deposit formation: facts and arguments. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 24. Available at: http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012024/pdf/1755-1315_24_1_012024.pdf (дата обращения: 10.02.2016).
10. Buryak V.A., Khmelevskaya N.M. *Suhoy Log – odno iz krupnyshikh zolotorudnykh mestorozhdeniy mira* [Sukhoi Log is one of the largest gold-ore deposits of the world]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 1997. 156 p.
11. Goldberg J.S., Abramson G., Los V.L. Depletion and enrichment of exploration for mineral deposits. *Geochemistry Exploration, Environment Analysis*, 2003, vol. 3, pp. 281–293.
12. Shao Jun, Hui De-feng, Kong Xiang-min, Shou Nai-wu. Metallogeny of gold deposits of China. *Geology and Resources*, 2004, vol. 13, no. 4, pp. 246–250.
13. Large R.R., Maslennikov V.V., Francois R., Danyushevsky L.V., Chang Zhaoshan. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena gold province, Russia. *Economic Geology*, 2007, vol. 102, no. 7, pp. 1233–1267.
14. Meffre S., Large R.R., Scott R., Woodhead J., Chang Z., Gilbert S.E., Danyushevsky L.V., Maslennikov V., Hergt J.M. Age and pyrite-Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log Sediment-hosted gold deposit, Russia. *Geochim. et Cosmochim. Acta.*, 2008, vol. 72, pp. 2377–2391.
15. Kryazhev S.G., Ustinov V.I., Grinenko V.A. Osobennosti flyuidnogo rezhima formirovaniya zolotorudnogo mestorozhdeniya Suhoy Log po izotopno-geokhimicheskim dannym [The features of fluid regime at formation of gold deposit Sukhoi Log by isotopic-geochemical data]. *Geokhimiya*, 2009, no. 10, pp. 1108–1117.
16. Chernyshov I.V., Chugaev A.V., Safonov Yu.G., Saroyan M.R., Yudovskaya M.A., Eremina A.V. Izotopny sostav svintsa po dannym vysokotochnogo ICP MS metoda i istochniki veshchestva krupnomasshtabnogo blagorodnometalnogo mestorozhdeniya Suhoy Log (Rossiya) [Lead isotopic composition by the data of high-precision ICP MS method and substance sources of large-scale precious-metal deposit Sukhoi Log (Russia)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 2009, vol. 51, no. 6, pp. 550–559.
17. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Rodionov N.V., Mokhov A.V., Antonov A.V., Sergeev S.A. Correlation of metamorphism and ore-formation in Sukhoi Log gold black-shale deposit by the data of U-Th-Pb-isotope SHRIMP-dating of accessory minerals. *Geology of ore deposits*, 2011, vol. 53, no. 1, pp. 32–64. In Rus.
18. Khanchuk A.I., Plyusnina L.P., Nikitenko E.M., Kurmina T.B., Barinov N.N. The Noble Metal Distribution in the Black Shales of the Degdekan Gold Deposit in Northeast Russia. *Russia Journal of Pacific Geology*, 2011, vol. 5, no. 2, pp. 89–96.
19. Jianping Wang, Jiajun Liu, Runmin Peno, Zhenjiang Liu, Baisheng Zhao, Zan Li, Yufeng Wang, Chonghao Lui. Gold mineralization in Proterozoic black shales: Example from the Haoyao-erhudong gold deposit, northern margin of the North China Craton. *Ore geology Reviews*, 2014, vol. 63, pp. 150–159.
20. Steadman J.A., Large R.R., Meffre S., Olin P.H., Danyushevsky L.V., Gregory D.D., Belousov I., Lounejeva E., Ireland T.R., Holden P. Synsedimentary to Early Diagenetic Gold in Black Shale-Hosted Pyrite Nodules at the Golden Mile Deposit, Kalgoorlie, Western Australia. *Economic Geology*, 2015, vol. 110, no. 5, pp. 1157–1191.
21. Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Spiridonov A.I., Nemerov V.K., Ivanov A.I., Mitrofanov G.L. Geodynamical conditions of gold deposits formation of Bodaibo Neoproterozoic depression. *Doklady RAN*, 2006, vol. 407, no. 6, pp. 793–797. In Rus.
22. Laverov N.P., Chernyshov I.V., Chugaev A.V., Bairova E.D., Goltsman Yu.V., Distler V.V., Yudovskaya M.A. Stages of formation of large-scale precious-metal mineralization of deposit Sukhoi Log (East Siberia): results of isotopic-geochronologic study. *Doklady RAN*, 2007, vol. 415, no. 2, pp. 236–241. In Rus.
23. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhovzin A.V. Petrology-geochemical features of near-ore metasomatism in Sukhoi Log gold-ore deposit (Lensk region). P. 2. Petrology of near-ore metasomatism. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012a, vol. 320, no. 1, pp. 28–37. In Rus.
24. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhovzin A.V. Petrology-geochemical features of near-ore metasomatism in Verninsk gold-ore deposit (Lensk region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012b, vol. 321, no. 1, pp. 22–33. In Rus.
25. Cherkasova T., Kucherenko I., Abramova R. Rear polymetal zone of near-veined metasomatic aureole in mesothermal Zun-Holba gold deposit (Eastern Sayan). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012003/pdf>. (accessed: 10.03.2016).
26. Kucherenko I., Yuxuan Zhang, Abramova R. Mineral-petrochemical wallrock alteration of rocks in Bericul gold-ore deposit (Kuznetsk Alatau). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012006/pdf> (accessed: 10.03.2016).
27. Zaraysky G.P. *Zonalnost i usloviya obrazovaniya metasomaticheskikh porod* [Zoning and conditions of metasomatic rocks formation]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 349 p.
28. Kucherenko I.V. Hydrodynamics of fracture-pore fluid-rock interactions and mechanism of mass transfer in near-fracture hydrothermal metasomatism processes. *Razvedka i okhrana nedr*, 2010, no. 11, pp. 37–43. In Rus.
29. Kucherenko I.V. O fosfor-magniy-titanovoy spetsializatsii zolotonosnykh berezhitov [On phosphorus-magnesium-titanium specialization of auriferous beresites]. *Doklady AN SSSR*, 1987, vol. 293, no. 2, pp. 443–447.

Received: 15.02.2016.

Information about the authors

Igor V. Kucherenko, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.316.3.048 (075.8)

ЁМКОСТНОЙ СПОСОБ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОПИТКИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Смирнов Геннадий Васильевич¹,
smirnov@main.tusur.ru

Смирнов Дмитрий Геннадьевич¹,
smirnov@main.tusur.ru

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Россия, 634045, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Актуальность работы обусловлена тем, что основная часть технологических процессов практически во всех отраслях промышленности, в том числе связанных с добычей, транспортировкой, переработкой минерального сырья, не может быть реализована без использования электродвигателей. Высокая надежность работы этих машин обеспечивает безаварийность и является гарантом безопасности людей в указанных отраслях промышленности. Показатели надежности работы электрических машин зависят от состояния изоляции обмоток, которое в значительной мере определяется насыщенностью полостей обмотки пропиточным составом, проникшим в них при пропитке. Совершенствование же технологии пропитки обмоток электрических машин, повышение их качества и надежности изоляции, невозможно реализовать без надлежащих методов контроля качества пропитки.

Цель работы: исследование применимости электрической ёмкости обмоток относительно корпуса для контроля качества пропитки обмоток электрических машин.

Методы исследования: электрические измерения ёмкостных характеристик обмоток электрических машин; измерения геометрических параметров компонент изоляции обмоток; метрологические методы оценки погрешностей косвенных измерений.

Результаты. Доказана возможность определения коэффициентов пропитки путем измерения емкостных характеристик обмотки относительно ее корпуса. Проведено обоснование критериев для оценки качества пропитки и получены формулы для их расчета. Достоверность результатов подтверждена экспериментально. Осуществлен подробный анализ метрологических характеристик предлагаемого способа. Реальные примеры показывают, что использование предлагаемого способа позволяет обеспечить высокую точность определения коэффициента пропитки обмоток статоров электрических машин. Результирующая косвенная ошибка определения коэффициентов пропитки не превышает 3,8 %.

Ключевые слова:

Пропитка, компаунд, электрическая ёмкость, диэлектрическая проницаемость, магнитный сердечник, конденсатор, статистические смеси.

Введение

Самым ненадежным узлом электрической машины является изоляция обмоток электрических машин [1, 2]. При этом убытки обусловлены не только большими затратами на ремонт или замену отказавших электродвигателей, но и простоем оборудования, в котором была задействована отказавшая электрическая машина. Надёжность изоляции обмоток электрических машин во многом зависит от качества изоляции обмоточного провода, от вида и состояния намоточного оборудования и технологии пропитки [3–6]. Именно в процессе пропитки обмоток пленкой пропиточного состава скрываются дефекты в витковой, межфазной и корпусной изоляции. В результате пропитки улучшаются не только электроизоляционные свойства обмоток, но возрастает и их теплопроводность, влагостойкость, монолитность и другие характеристики, повышающие надежность изоляции обмоток.

Содержание влаги в воздухе, высокие и низкие температуры воздуха оказывают неблагоприятное воздействие на изоляцию обмоток электроприводов, ускоряя процесс изнашивания полимерных материалов, снижая их электрическую прочность [7, 8]. Процесс проникновения влаги в обмотки

электрических машин усугубляется при их плохой пропитке, когда степень заполненности межвитковых и прикорпусных полостей пропиточным составом низка. При этом в изоляции обмоток образуются многочисленные поры и капилляры, в которые проникает и адсорбируется влага, что приводит к ускоренному старению изоляции обмоток и значительному повышению вероятности их отказа [9].

Большую опасность представляет недопустимый нагрев обмоток электрических машин [8], вызываемый длительными перегрузками, ухудшением условий охлаждения электрооборудования, обрывом одной из фаз сети и работой электрооборудования в неполнофазном режиме, отклонениями напряжения выше допустимых пределов, частыми или затянувшимися пусками электродвигателей, а также их опрокидыванием и заклиниванием ротора и др. Важное значение для обеспечения надежности и безопасности работы имеет периодический контроль сопротивления изоляции обмоток, величина и скорость изменения которого при эксплуатации помимо прочих факторов зависит также и от качества пропитки обмоток.

Перед монтажом электродвигателя в промышленные установки его необходимо тщательно ос-

мотреть, при помощи мегомметра проверить сопротивление изоляции между фазами и между фазами и корпусом. Для проверки изоляции электродвигателей с рабочим напряжением обмоток 380/660 В рекомендуется пользоваться мегомметром на напряжение 1 кВ. Измеренное сопротивление изоляции между корпусом и обмоткой электродвигателя должно быть не менее 1,5 МОм. Однако высокое исходное сопротивление изоляции обмоток еще не является гарантией её высокой надежности. Это обусловлено тем, что при низкой степени заполнения межвитковых и прикорпусных полостей обмоток пропиточным составом в воздушных полостях незаполненной пропиточным составом изоляции обмотки может конденсироваться влага, пыль, различные химические вещества, что вызовет ускоренное снижение сопротивления изоляции.

Кроме приведенных выше причин снижения качества изоляции обмоток, существуют еще так называемое естественное старение и износ изоляции, заключающийся в ухудшении состояния из-за воздействия окружающей среды и выделяемого обмоткой тепла, которое зависит от теплопроводности пропиточного состава и качества пропитки [10]. Вследствие нарушения изоляции происходит витковое замыкание. Если это замыкание произошло в обмотке якоря машины, то при вращении его в магнитном поле в замкнутых накоротко витках якоря, вследствие их малого сопротивления, возникнут большие токи и через несколько десятков секунд короткого замыкания изоляция обуглится. Кроме виткового замыкания, часто происходит замыкание между секциями обмотки. Такое замыкание может возникнуть на коллекторных пластинах вследствие их деформации, заполнения промежутков между пластинами проводящей влагой или проводящей пылью.

Пропитка обмоток приводит к повышению их монолитности, механической прочности, влагостойкости и теплопроводности, что в значительной мере приводит к повышению надежности, безотказности и безаварийности работы [11].

Совершенствование технологии пропитки, оперативное устранение технологических причин, приводящих к некачественной пропитке, невозможно реализовать без разработки и внедрения неразрушающих методов контроля качества указанной технологической операции.

Теоретическая часть

Попытки найти простой и достоверный способ контроля пропитки предпринимались относительно давно. В частности, в работе [12] был предложен ёмкостной метод контроля качества пропитки обмоток электрических машин, который заключался в измерении емкости обмотки относительно магнитного сердечника до пропитки $C_{ид}$ и емкости относительно магнитного сердечника после пропитки и сушки обмотки $C_{ин}$. Качество пропитки было

предложено оценивать по коэффициенту пропитки $K_{пр}$, определяемому из выражения

$$K_{пр} = \frac{C_{ин}}{C_{ид}}. \quad (1)$$

Недостатком этого способа является низкая точность контроля, так как величины $C_{ид}$ и $C_{ин}$ зависят от расположения витков в обмотке, а также от того, как распределен состав по корпусным полостям обмотки. При попадании одинакового количества (массы) пропиточного состава в две разные однотипные обмотки одной партии $K_{пр}$, определяемый по формуле (1), может давать существенно отличающиеся друг от друга значения. Поэтому формула (1) не позволяет объективно судить о насыщенности полостей обмотки пропиточным составом. Кроме того, коэффициент пропитки, определяемый выражением (1), не дает представления о степени заполненности объема пор и капилляров в обмотке пропиточным составом.

В работе [13] для оценки наполненности обмотки пропиточным составом использовался метод, основанный на измерении ёмкости специально вставленного в обмотку центрального проводника относительно магнитного корпуса (магнитного сердечника) статора до и после пропитки. Необходимым условием использования данного метода является наличие центрального проводника, изолированного от остальных проводников обмотки, который в реальных обмотках электрических машин отсутствует. Поэтому применение данного метода требует изменения конструкции контролируемого изделия или подготовки имитационных макетов. Кроме того, метод обладает низкой точностью, поскольку измеряемая величина емкости проводника относительно корпуса, как до пропитки, так и после неё, мала и составляет лишь десятки пикофарад. Малое значение указанной емкости предъявляет высокие требования к точности используемых средств измерения и приводит к большим погрешностям.

Рассмотрим вопрос о возможности использования ёмкости обмоток относительно магнитного сердечника в качестве информационного фактора, с помощью которого можно определить степень заполненности (насыщенности) пропиточным составом полостей обмотки.

Основываясь на представлении емкости обмотки относительно корпуса изделия в виде слоистой системы (см. рисунок) и постоянстве отношения емкостей обмотки после погружения ее в диэлектрическую жидкость к емкости этой же обмотки до погружения, покажем, каким образом можно найти $K_{пр}$ [14, 15].

На рисунке *a* представлено сечение обмотки в одном из пазов. Оно состоит из проводов 1, покрытых слоем эмали 2, корпусной изоляции 3, поверхности паза 4, воздушных полостей между поверхностью обмотки и корпусной изоляцией 5 и воздушных полостей между корпусной изоляцией и

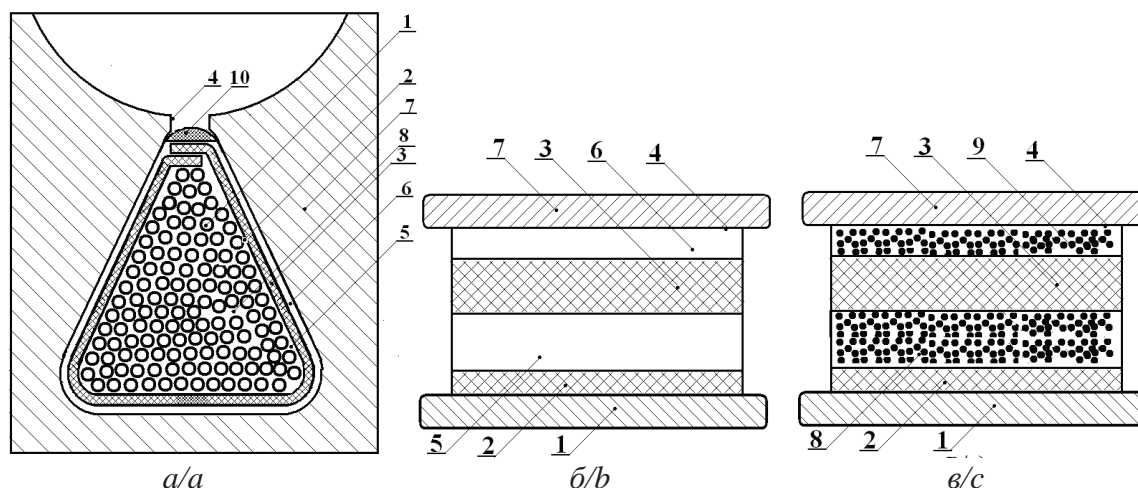


Рисунок. Сечение обмотки в одном из пазов (а) и представление её корпусных полостей в виде слоистого конденсатора до пропитки (б) и после неё (в). 1 – провод; 2 – эмалевая изоляция; 3 – диэлектрическая изоляционная пленка (корпусная изоляция); 4 – поверхность паза; 5 – воздушные полости между поверхностью обмотки и изоляционной диэлектрической пленкой; 6 – воздушные полости между изоляционной диэлектрической пленкой и поверхностью паза; 7 – магнитный сердечник (корпус); 8, 9 – полости обмотки 5, 6 после пропитки и сушки; 10 – клин

Figure. Cross section of the winding in the groove (a) and its presentation in the form of multilayer capacitors before (b) and after (c) impregnation. 1 is the wire; 2 is the enamel insulation; 3 is the dielectric insulating film (corpus insulation); 4 is the groove surface; 5 is the air cavities between the coil surface and the insulating dielectric film; 6 is the air cavity between the insulating dielectric film and the surface of the groove; 7 is the magnetic core (body); 8, 9 are the windings 5, 6 hollows after impregnation and drying; 10 is the wedge

поверхностью паза 6, а также из магнитного сердечника (корпуса) 7.

Ёмкость обмотки относительно корпуса, который является магнитный сердечник статора электрической машины, можно представить в виде слоистого плоского конденсатора до пропитки (рисунок, б) и после неё (рисунок, в). На рисунке б и в введены те же обозначения, что и на сечении обмотки, только на рисунке в вместо позиций 5 и 6 введены позиции 8 и 9, так как воздушные полости обмотки 5 и 6 после пропитки и сушки частично заполняются пропиточным составом. В связи с этим позициями 8 и 9 обозначены те же полости 5 и 6, но заполненные статистически распределенными по этим полостям частицами пропиточного состава. На рисунке, изображающем сечение обмотки в одном из пазов, цифрой 10 обозначен клин обмотки. Ёмкость непропитанной обмотки относительно корпуса изделия состоит из последовательно соединенных слоев (рисунок, б): эмалевой изоляции провода 2, корпусной изоляции 3, воздушной прослойки 5 между поверхностью обмотки и корпусной изоляцией, воздушной прослойки 6 между корпусной изоляцией и поверхностью паза изделия. Обозначим емкости слоев, соответственно, C_1, C_2, C_3, C_4 . С учетом того, что слои 2, 3, 5, 6 соединены последовательно, емкость любой i -й непропитанной обмотки можно представить в виде выражения

$$\frac{1}{C_{ид}} = \frac{1}{C_{i1}} + \frac{1}{C_{i2}} + \frac{1}{C_{i3}} + \frac{1}{C_{i4}}. \quad (2)$$

Формулу (2) можно преобразовать к виду

$$\frac{1}{C_{идп}} = \frac{1}{C_{iэк}} + \frac{1}{C_{iв}}, \quad (3)$$

где $C_{iэк} = \frac{C_{i1}C_{i3}}{C_{i1} + C_{i3}}$ – эквивалентная емкость последовательно соединенных слоев эмалевой 2 и корпусной 3 изоляции; $C_{iв} = \frac{C_{i2}C_{i4}}{C_{i2} + C_{i4}}$ – эквивалентная емкость воздушных прослоек 5 и 6.

Эквивалентную емкость воздушных прослоек $C_{iв}$ можно представить в виде произведения геометрического фактора g_i на диэлектрическую проницаемость воздуха ϵ_v :

$$C_{iв} = g_i \epsilon_v. \quad (4)$$

С учетом введенных обозначений формулу (3) можно представить в виде

$$\frac{1}{C_{идп}} = \frac{1}{C_{iэк}} + \frac{1}{g_i \epsilon_v}. \quad (5)$$

При пропитке обмотки величины $C_{iэк}$ и g_i остаются неизвестными, а изменяется только величина $C_{iв}$ в результате замещения воздуха в полостях обмотки пропиточным составом (рисунок, в, слои 7 и 8).

Если представить пропиточный состав, оставшийся в обмотке после пропитки, в виде статистической смеси, состоящей из пропиточного состава объёмом $V_{ин}$ и пузырьков воздуха в нем, то емкость обмотки относительно корпуса изделия после пропитки можно представить в виде

$$\frac{1}{C_{ин}} = \frac{1}{C_{iэк}} + \frac{1}{g_i \varepsilon_i^*}, \quad (6)$$

где ε_i^* – эквивалентная диэлектрическая проницаемость статистической смеси [16–19].

Значение ε_i^* можно определить из формулы Лихтенекера–Ротера [20]:

$$\ln \varepsilon_i^* = \frac{V_{ин}}{V} \ln \varepsilon_л - \frac{V - V_{ин}}{V} \ln \varepsilon_в, \quad (7)$$

где $\varepsilon_л$ – диэлектрическая проницаемость пропиточного состава.

Учитывая, что диэлектрическая проницаемость воздуха $\varepsilon_в=1$, получим:

$$\ln \varepsilon_i^* = \frac{V_{ин}}{V} \ln \varepsilon_л = K_{пр} \ln \varepsilon_л, \quad (8)$$

где V – суммарный объем прикорпусных воздушных полостей 5 и 6 до пропитки.

Из формулы (8) следует, что

$$K_{пр} = \frac{1}{\ln \varepsilon_л} \ln \varepsilon_i^*. \quad (9)$$

Из уравнения (6) получаем:

$$\varepsilon_i^* = \frac{C_{ин} C_{iэк}}{g_i (C_{iэк} - C_{ин})}. \quad (10)$$

Однако в выражении (10) неизвестными величинами являются $C_{iэк}$ и g_i . Эти величины можно найти в каждой из i -й контролируемых обмоток, воспользовавшись примечательным свойством, которое заключается в следующем. Ёмкости непропитанных обмоток относительно магнитного сердечника имеют большой разброс. Однако, несмотря на это, если осуществить имитацию 100% -й пропитки путем погружения изделий в диэлектрическую невязкую жидкость с известной диэлектрической проницаемостью ε_1 , то отношение ёмкостей обмоток относительно корпуса после имитации в них 100% -й пропитки к ёмкостям тех же обмоток до пропитки является постоянной величиной $A = \frac{C_{i,100\%}}{C_{ид}} = \text{const}$, значение которой зависит

только от величины ε_1 .

Поскольку величина A не зависит от первоначального значения емкостей обмотки относительно корпуса и одинакова для всех однотипных изделий при погружении их в диэлектрическую жидкость с проницаемостью ε_1 , то для нахождения величины A достаточно измерить емкости относительно корпуса до погружения в жидкость и после погружения в нее только у одной из контролируемых обмоток.

Подставив значение величины A в выражения (5), (6) и учитывая, что для любой из контролируемых обмоток величина емкости относительно корпуса, измеренная после погружения обмотки в калибровочную диэлектрическую жидкость $C_{i,100\%}$, связана с емкостью этой же обмотки до погружения в жидкость $C_{ид}$ соотношением $C_{i,100\%} = AC_{ид}$, получим:

$$g_i = \frac{C_{ид} A (\varepsilon_1 - 1)}{(A - 1) \varepsilon_1}; \quad (11)$$

$$C_{iэк} = \frac{C_{ид} A (\varepsilon_1 - 1)}{(\varepsilon_1 - A)}. \quad (12)$$

Подставив уравнения (11) и (12) в (9), получим:

$$K_{имп} = \frac{1}{\ln \varepsilon_л} \ln \frac{C_{ин} \varepsilon_1 (A - 1)}{AC_{ид} (\varepsilon_1 - 1) - C_{ин} (\varepsilon_1 - A)}. \quad (13)$$

Расчет методических погрешностей контроля

Оценим погрешности в определении коэффициентов пропитки прикорпусных полостей обмотки $K_{имп}$.

В соответствии с выражением (13) погрешность в определении можно представить в виде

$$\frac{\Delta K_{имп}}{K_{имп}} = B_1 \frac{\Delta \varepsilon_л}{\varepsilon_л} + B_2 \frac{\Delta \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + B_3 \frac{\Delta C_{ин}}{C_{ин}} + B_4 \frac{\Delta C_{ид}}{C_{ид}} + B_5 \frac{\Delta A}{A}, \quad (14)$$

где B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 – коэффициенты влияния на погрешность составляющих $\varepsilon_л, \varepsilon_1, C_{ин}, C_{ид}, A$ соответственно. Значения коэффициентов влияния, в соответствии с [21, 22], определяются по формуле

$$B_i = \left| \frac{\partial K_{имп}}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{K_{имп}} \right|, \quad (15)$$

где x_i – параметры, соответственно, $\varepsilon_л, \varepsilon_1, C_{ин}, C_{ид}, A$; $i=1, 2, 3, 4, 5$.

С учетом выражений (13) и (15) получим:

$$B_1 = \left| \frac{-1}{\ln \varepsilon_л} \right|; \quad (16)$$

$$B_2 = \left| \frac{A(C_{ин} - C_{ид})}{\left([AC_{ид}(\varepsilon_1 - 1) - C_{ин}(\varepsilon_1 - A)] \times \right. \right.} \left. \left. \times \ln \frac{\varepsilon_1 C_{ин} (A - 1)}{AC_{ид}(\varepsilon_1 - 1) - C_{ин}(\varepsilon_1 - A)} \right) \right|; \quad (17)$$

$$B_3 = \left| \frac{AC_{ид}(\varepsilon_1 - 1)}{\left([AC_{ид}(\varepsilon_1 - 1) - C_{ин}(\varepsilon_1 - A)] \times \right. \right.} \left. \left. \times \ln \frac{\varepsilon_1 C_{ин} (A - 1)}{AC_{ид}(\varepsilon_1 - 1) - C_{ин}(\varepsilon_1 - A)} \right) \right|; \quad (18)$$

$$B_4 = \left| \frac{-AC_{ид}(\varepsilon_1 - 1)}{\left([AC_{ид}(\varepsilon_1 - 1) - C_{ин}(\varepsilon_1 - A)] \times \right. \right.} \left. \left. \times \ln \frac{\varepsilon_1 C_{ин} (A - 1)}{AC_{ид}(\varepsilon_1 - 1) - C_{ин}(\varepsilon_1 - A)} \right) \right|; \quad (19)$$

$$B_5 = \left| \frac{A(C_{ин} - C_{ид})(\varepsilon_1 - 1)}{\left((A - 1)[AC_{ид}(\varepsilon_1 - 1) - C_{ин}(\varepsilon_1 - A)] \times \right. \right.} \left. \left. \times \ln \frac{\varepsilon_1 C_{ин} (A - 1)}{AC_{ид}(\varepsilon_1 - 1) - C_{ин}(\varepsilon_1 - A)} \right) \right|. \quad (20)$$

Для определения численных значений коэффициентов влияния B_1, B_2, B_3, B_4 и B_5 необходимо задаться численными значениями входящих в формулу (14) параметров. Диэлектрическая проницаемость ε_n компаунда КП-34 в отвержденном состоянии равна 3,3. Диэлектрическая проницаемость керосина ε_1 , использованного нами для имитации 100% -й пропитки равна 2,074. Эти величины были измерены по методике, рекомендованной ГОСТ 64334–71. Для двигателей 4АИР112М4 номинальные значения $C_{ид}$ и $C_{ин}$ определялись по статистическим данным, набранным для этих электродвигателей на заводе ПО «Сибэлектромотор». Номинальные среднестатистические значения $C_{ид}$ и $C_{ин}$ были равны, соответственно, 2957 пФ и 4192 пФ. Величина A определялась по результатам статических исследований и была равна 1,553.

Подставив численные значения параметров в формулы (16)–(20), определяющие коэффициенты влияния, получим: $B_1=0,838, B_2=1,124, B_3=4,995, B_4=4,995, B_5=2,464$.

Оценим величины $\frac{\Delta\varepsilon_n}{\varepsilon_n}, \frac{\Delta\varepsilon_1}{\varepsilon_1}, \frac{\Delta C_{ин}}{C_{ин}}, \frac{\Delta C_{ид}}{C_{ид}}, \frac{\Delta A}{A}$.

Диэлектрическая проницаемость пропиточного состава КП-34 в отвержденном состоянии измерялась по ГОСТ 64334–71 на трехэлектродной зажимной ячейке с помощью цифрового измерителя емкости Е8–4. При подготовке образцов компаунда к измерению диэлектрической проницаемости продолжительность полимеризации в толстом (4–5 мм) слое осуществлялась при температуре $(125 \pm 5)^\circ\text{C}$ не более 3 минут. Диэлектрическая проницаемость определялась по формуле

$$\varepsilon_n = \frac{C_{яп}}{C_{я}}, \quad (21)$$

где $C_{я}, C_{яп}$ – емкости ячейки соответственно без образца пропиточного состава и с ним. В соответствии с выражением (14) можно записать:

$$\frac{\Delta\varepsilon_n}{\varepsilon_n} = B_6 \frac{\Delta C_{я}}{C_{я}} + B_7 \frac{\Delta C_{яп}}{C_{яп}}, \quad (22)$$

где B_6 и B_7 – коэффициенты влияния, определяемые по формуле (15).

В соответствии с выражением (15) $B_6=B_7=1$.

Величины $C_{я}$ и $C_{яп}$ были равны, соответственно, 31,46 и 103,82 пФ.

В соответствии с паспортными данными на измеритель емкости Е8–4 погрешность C определяется по формуле

$$\Delta C = (0,001C + 0,02 \text{ пФ} + 1 \text{ ед. счета}), \quad (23)$$

где C – измеренная величина емкости.

Подставив в формулу (23) значения емкостей $C_{я}$ и $C_{яп}$, получим:

$$\Delta C_{я} = 6,145 \cdot 10^{-2} \text{ пФ};$$

$$\Delta C_{яп} = 2,24 \cdot 10^{-1} \text{ пФ}.$$

Следовательно, величина относительной погрешности в измерении ε_n , в соответствии с (22), равна:

$$\frac{\Delta\varepsilon_n}{\varepsilon_n} = \frac{6,145 \cdot 10^{-2}}{31,46} + \frac{2,24 \cdot 10^{-2}}{103,82} = 0,00216.$$

Величина относительной погрешности измерения диэлектрической проницаемости калибровочной жидкости (керосина) находится по аналогичной формуле:

$$\frac{\Delta\varepsilon_1}{\varepsilon_1} = \frac{6,145 \cdot 10^{-2}}{31,46} + \frac{9,5277 \cdot 10^{-2}}{65,27} = 0,00341.$$

Абсолютные погрешности в измерении емкости обмотки $C_{ид}$ и $C_{ин}$ определяются из соотношения (23) и равны, соответственно, 3,977 и 5,212 пФ. Относительные погрешности в измерении емкостей $C_{ид}$ и $C_{ин}$ равны:

$$\frac{\Delta C_{ид}}{C_{ид}} = 2,3 \cdot 10^{-3}; \quad \frac{\Delta C_{ин}}{C_{ин}} = 2,4 \cdot 10^{-3}.$$

Оценим погрешность, вносимую в измерения коэффициента пропитки $K_{инп}$, величиной A . Ёмкости, входящие в соотношение (2), можно представить в виде выражений:

$$C_{io} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_a p S_n}{d_a}; \quad (24)$$

$$C_{i1} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_b p S_n}{d_1}; \quad (25)$$

$$C_{iy\ddot{e}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_n p S_n}{d_n}; \quad (26)$$

$$C_{i2} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_b p S_n}{d_2}; \quad (27)$$

где ε_0 – коэффициент размерности; $\varepsilon_a, \varepsilon_n, \varepsilon_b$ – диэлектрические проницаемости соответственно воздушной прослойки, корпусной изоляции, эмали провода; S_n – площадь поверхности паза; p – количество пазов статора; d_a, d_1, d_n, d_2 – эквивалентные толщины эмали провода, воздушной прослойки между корпусом изделия и корпусной изоляцией, корпусной изоляции и воздушной прослойки между корпусной изоляцией и обмоткой соответственно.

Из выражения (2), с учетом выражений (24)–(27), ёмкость $C_{ид}$ будет равна:

$$C_{ид} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_a \varepsilon_n \varepsilon_b p S_n}{d_b \varepsilon_a \varepsilon_n + (d_n \varepsilon_a + d_a \varepsilon_n) \varepsilon_b}, \quad (28)$$

где $d_b = d_1 + d_2$; $\varepsilon_b = 1$.

С учетом того, что диэлектрическая проницаемость воздуха $\varepsilon_a = 1$, выражение (28) можно записать в виде

$$C_{ид} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_n \varepsilon_b p S_n}{d_b \varepsilon_n \varepsilon_b + (d_n \varepsilon_a + d_a \varepsilon_n) \varepsilon_b}. \quad (29)$$

У погруженного в диэлектрическую жидкость изделия выражение для расчета электрической емкости $C_{100\%}$ между корпусом изделия и проводом обмотки, с учетом выражения (29), имеет вид:

$$C_{100\%} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_n \varepsilon_b p S_n}{d_b \varepsilon_n \varepsilon_b + (d_n \varepsilon_a + d_a \varepsilon_n) \varepsilon_b}. \quad (30)$$

Величину A , с учетом выражений (29) и (30), можно записать в виде

$$A = \frac{C_{100\%}}{C_{ид}} = \varepsilon_1 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_3 \varepsilon_n + (d_n \varepsilon_3 + d_3 \varepsilon_n)}{d_3 \varepsilon_3 \varepsilon_n + (d_n \varepsilon_3 + d_3 \varepsilon_n) \varepsilon_1}. \quad (31)$$

Для статоров электродвигателей 4А112М4 число пазов $p=36$, $S_n=4536$ мм², $\varepsilon_n=2,1$; $\varepsilon_3=2,2$; $d_n=0,25$ мм, $d_3=0,04$ мм.

Величина электрической ёмкости эмалевого слоя и корпусной изоляции, в соответствии с выражениями (24), (25), будет равна:

$$C_{iy} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_3 p S_n}{d_3} = \frac{8,85 \cdot 10^{-3} \cdot 2,2 \cdot 36 \cdot 4536}{0,04} = 79484,33 \text{ пФ};$$

$$C_{ie} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_n p S_n}{d_n} = \frac{8,85 \cdot 10^{-3} \cdot 2,17 \cdot 36 \cdot 4536}{0,25} = 2752,704 \text{ пФ}.$$

Среднестатистическое значение емкости непропитанной обмотки относительно корпуса равно: $C_{ia}=2957$ пФ. Используя эту величину, определим из выражения (29) численное значение эквивалентного воздушного зазора d_a :

$$d_a = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_3 \varepsilon_n S_n p - C_{ia} (d_n \varepsilon_3 + d_3 \varepsilon_n)}{C_{ia} \varepsilon_3 \varepsilon_n} = \frac{[8,85 \cdot 10^{-3} \cdot 2,2 \cdot 2,1 \cdot 36 \cdot 4536 - 2957(0,25 \cdot 2,2 + 0,04 \cdot 3,1)]}{2957 \cdot 2,2 \cdot 2,1} = 0,351 \text{ мм}.$$

Эксперименты показали, что емкости непропитанных обмоток относительно корпуса могут отличаться друг относительно друга на 15–20 %. Этот разброс емкостей может быть обусловлен рядом причин: нестабильностью толщины эмалевого покрытия провода d_3 ; нестабильностью толщины корпусной изоляции d_n ; нестабильностью эквивалентного воздушного зазора d_a . Оценим, насколько приемлемо допущение постоянства величины A для всех однотипных обмоток. Для этой цели найдем, в каком диапазоне значений изменяется величина A , если емкости непропитанных обмоток имеют разброс ± 20 %.

Пусть толщина эмалевого покрытия и корпусной изоляции от обмотки к обмотке изменяется на ± 30 %, а толщина эквивалентного воздушного зазора – на ± 40 %. Тогда минимальные и максимальные значения толщины эмали, корпусной изоляции и воздушного зазора будут равны:

$$d_{amin}=0,028 \text{ мм}, d_{amax}=0,052 \text{ мм};$$

$$d_{nmin}=0,175 \text{ мм}, d_{nmax}=0,325 \text{ мм};$$

$$d_{amin}=0,2106 \text{ мм}, d_{vmax}=0,4914 \text{ мм}.$$

В соответствии с формулой (31) при наихудших сочетаниях эквивалентных толщин слоев расчетная величина A_r будет иметь значение:

$$A_{rmin}=1,589, A_{rmax}=1,613.$$

При наихудших сочетаниях эквивалентных толщин слоев величина $C_{ид}$, в соответствии с формулой (29), будет иметь значения:

$$C_{идmax}=4712,6 \text{ пФ}, C_{идmin}=1677,7 \text{ пФ}.$$

Разброс емкостей непропитанных обмоток относительно среднестатистического значения емкости составит:

$$\delta C_{идmax} = \frac{4712,6 - 2957}{2957} \cdot 100 \% = +59 \%;$$

$$\delta C_{идmin} = \frac{1677,7 - 2957}{2957} \cdot 100 \% = -43,3 \%.$$

Разброс A_r относительно среднего теоретического составит:

$$\delta A_{rmin} = \frac{1,589 - 1,593}{1,593} \cdot 100 \% = -2,51 \%;$$

$$\delta A_{rmax} = \frac{1,613 - 1,593}{1,593} \cdot 100 \% = +1,26 \%.$$

Таким образом, варьирование толщины корпусной изоляции и эмали провода в пределах ± 30 %, а толщины эквивалентного воздушного промежутка в пределах ± 40 % приводит к максимальной погрешности, вызванной непостоянством значения величины A , не более чем на 2,51 %, в то время как величина емкостей непропитанных обмоток при указанных вариациях изменяется на величину $\pm 59,37$ %, что можно считать теоретическим подтверждением постоянства величины. Эксперименты, проведенные на 50 обмотках электродвигателей серии 4АИР112М4 путем имитации в них 100% -й пропитки погружением их в керосин, показали что при среднем значении $A_3=1,553$ абсолютная погрешность в измерении $\Delta A = \pm 0,021$, а относитель-

$$\text{ная погрешность } \frac{\Delta A_3}{A_3} = \frac{\pm 0,021}{1,553} = \pm 0,0135.$$

Ошибки, составляющие результирующую погрешность, не коррелируют между собой, так как их источником являются разные причины. С учетом полученных численных значений коэффициентов влияния и погрешностей величин, входящих в формулу (3.91), величина максимальной результирующей относительной погрешности определения коэффициента пропитки прикорпусных полостей обмоток равна:

$$\frac{\Delta K_{пр}}{K_{пр}} = \sqrt{\left[\left(B_1 \frac{\Delta \varepsilon_n}{\varepsilon_n} \right)^2 + \left(B_2 \frac{\Delta \varepsilon_1}{\varepsilon_1} \right)^2 + \left(B_3 \frac{\Delta C_{ин}}{C_{ин}} \right)^2 + \left(B_4 \frac{\Delta C_{ид}}{C_{ид}} \right)^2 + \left(B_5 \frac{\Delta A}{A} \right)^2 \right]} = \sqrt{\left[3,28 \cdot 10^{-6} + 1,47 \cdot 10^{-5} + 1,44 \cdot 10^{-4} + 1,32 \cdot 10^{-4} + 1,11 \cdot 10^{-3} \right]} = 3,75 \cdot 10^{-2}.$$

Таким образом, результирующая погрешность изменения $K_{пр}$ по двум измерениям ёмкости обмотки относительно магнитного сердечника статора до и после пропитки.

Заключение

В работе проведено обоснование ёмкостного способа контроля качества пропитки. Обоснован выбор критериев для оценки качества пропитки. Приведены формулы для определения коэффициента пропитки прикорпусных полостей обмотки, показывающие, что степень заполненности указанных по-

лостей пропиточным составом можно определить по изменению в процессе пропитки ёмкости обмоток относительно магнитного сердечника. Проведена оценка погрешностей предлагаемого способа контроля на примере реальных двигателей серии АИР. Показано, что результирующая погрешность контроля качества пропитки не превышает 3,75 %.

Предлагаемый способ имеет достаточно высокую точность, не требует изготовления дорогостоящих оригинальных средств контроля, а позволяет использовать обычные, широко распространенные на практике измерители ёмкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курбатова О.А., Павлюченко В.М. Монтаж и ремонт горных машин и электрооборудования. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2004. – 286 с.
2. Применение магнитодиэлектрического композита на основе ультрадисперсного порошка никель-цинковых частиц для ресурсосберегающей технологии пропитки обмоток электрических машин / Г.В. Смирнов, О.Л. Хасанов, Д.Г. Смирнов, В.В. Полисадова, М.С. Петюкевич, З.Г. Бикбаева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 11. – С. 106–117.
3. A new generation of aluminum enameled winding wires / B. Smyrak, T. Knych, A. Mamala, P. Uliasz, M. Jabłoński // Wire Journal International. – 2012. – V. 45. – № 1. – P. 55–61.
4. PDIV characteristics of twisted-pair of magnet wires with repetitive impulse voltage / K. Kimura, S. Ushirone, T. Koyanagi, M. Hikita // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Ins. – Chicago, June 2007. – V. 14. – № 3. – P. 744–750.
5. ГОСТ ИЕС 60851–5–2011. Провода обмоточные. Методы испытаний. Ч. 5. Электрические свойства. – М.: Стандартиформ, 2014. – 19 с.
6. IEC 60851–5:1996 Methods of test winding wires. Part 5: Electrical properties. URL: <http://www.cntd.ru/assets/files/upload/240713/60851-5-2011.pdf> (дата обращения: 08.02.2016).
7. Похолков Ю.П., Бесперстов П.П., Пыхтин В.В. Исследование влияния технологического процесса изготовления обмоток на дефектность витковой изоляции асинхронных двигателей // Известия Томского политехнического института. – 1975. – Т. 222. – С. 52–65.
8. Борисенко А.И., Костиков О.Н., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
9. Смирнов Г.В. Надежность изоляции обмоток электротехнических изделий. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 1990. – 192 с.
10. Тепловые свойства магнитодиэлектрических композиционных составов на основе компаунда КП-34 и ультрадисперсного никель-цинкового порошка / Г.В. Смирнов, О.Л. Хасанов, Д.Г. Смирнов, В.В. Полисадова, М.С. Петюкевич, С.А. Понамарева // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 6/2. – С. 291–296.
11. Кондратюк А.А., Матренин С.В., Недосекова О.Ю. Исследование влияния количества наполнителя на механические характеристики композиционных полимеров // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 57. – № 9/3. – С. 98–102.
12. Кондратьева Н.Г., Кузнецов Н.А. Сравнительная оценка коэффициентов заполнения паза пропиточным составом, определенных различными методами // Технология электротехнического производства. – 1981. – № 12. – С. 14–16.
13. Дудкин А.Н. Разработка методов оценки технологического процесса пропитки обмоток асинхронных двигателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01. – Томск, 1980. – 163 с.
14. Способ определения коэффициента пропитки обмоток электрических машин: авт. свид. СССР № 1241361; заявл. 24.06.83; опубл. 30.06.86. Бюл. № 24. – 4 с.
15. Способ определения коэффициента пропитки отверждаемым полимерным составом обмоток электрических машин: пат. Рос. Федерация № 2521439; заявл. 25.10.12; опубл. 27.06.2014, Бюл. № 18. – 22 с.
16. Prasad A., Prasad K. Effective permittivity of random composite media: a comparative study // Physica. – 2007. – V. 396. – P. 132–137.
17. Measurement of bubble sizes in fluidised beds using electrical capacitance tomography / T.C. Chandrasekera, Y. Li, D. Moody, M.A. Schnellmann, J.S. Dennis, D.J. Holland // Chemical Engineering Science. – 2015. – V. 126. – P. 679–687.
18. Dielectric Materials for Pulse Power Energy Storage / Barber P., Balasubramanian S., Y. Angucha my, Gong S., Wibowo A., Gao H., Ploehn H., Loye H. // Materials. – 2009. – V. 2. – P. 1697–1733.
19. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. – М.: Энергия, 1973. – 328 с.
20. Kanuta Musataka, Hakamada Taheschi, Kana Ikusi. Function tests for induction motor insulation // Hitachi Review. – 1975. – V. 21. – № 11. – P. 436–443.
21. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1985. – 248 с.
22. The new concepts of measurement error theory / Xiaoming Ye, Xuebin Xiao, Junbo Shi, Mo Ling // Measurement. – 2016. – V. 83. – P. 96–105.

Поступила 13.02.2016 г.

Информация об авторах

Смирнов Г.В., доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института электронного технологического оборудования и систем связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

Смирнов Д.Г., кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института электронного технологического оборудования и систем связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

UDC 621.316.3.048 (075.8)

CAPACITIVE METHOD FOR CONTROLLING THE QUALITY OF WINDING IMPREGNATION IN ELECTRIC MOTOR FOR GENERAL INDUSTRIAL USE

Gennadiy V. Smirnov¹,
smirnov@main.tusur.ru

Dmitriy G. Smirnov¹,
smirnov@main.tusur.ru

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
40, Lenin Avenue, Tomsk, 634045, Russia.

The relevance of the work is caused by the fact that the majority of technological processes almost in all industries, including those related to extraction, transportation, processing of mineral raw materials, cannot be implemented without the use of electric motors. High reliability of these machines provides trouble-free operation and guarantees human safety in these industries. The reliability indices of electrical machine operation depend on insulation condition of the windings, which is largely determined by the quality of impregnation. It is impossible to improve winding impregnation, increase the quality and reliability of isolation, without certain methods for controlling the impregnation quality.

The main aim of the research is to study the applicability of winding electrical capacitance relative to the housing to control the quality of winding impregnation in electrical machines.

Research methods: measurement of electrical capacitive characteristics of the windings of electrical machines; measurement of geometric parameters of winding components; metrological methods to estimate errors of indirect measurements.

Results. The authors have proved the possibility of determining the impregnation coefficients by measuring the capacitive characteristics of the winding relative to its body; substantiated the criteria to evaluate the quality of impregnation and formulas for their calculation. The reliability of the results is confirmed experimentally. The paper introduces the detailed analysis and evaluation of metrological characteristics of the proposed method. Real examples show that use of the proposed method allows ensuring high accuracy in determining the winding impregnation coefficient in stators of electric machines. Indirect error of determining the impregnation coefficients does not exceed 3,8 %.

Key words:

Impregnation, compound, electrical capacitance, dielectric constant, magnetic core, capacitor, statistical mixture.

REFERENCES

1. Kurbatov O.A., Pavlyuchenko V.M. *Montazh i remont gornogo oborudovaniya* [Installation and repairing of mining machinery and electrical equipment.] Vladivostok, Publ. house of DVG TU, 2004. 286 p.
2. Smirnov G.V., Khasanov O.L., Smirnov D.G., Polisadov V.I., Petukevich M.S., Bikbaeva Z.G. Application of magneto-electric composite based on ultrafine powder of Nickel-zinc particles for resource-saving technology of impregnation of windings of electrical machines. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 11, pp. 106–117. In Rus.
3. Knych T., Mamala A., Uliasz P., Jabłoński M. A new generation of aluminum enameled winding wires. *Wire Journal International*, 2012, vol. 45, no. 1, pp. 55–61.
4. Kimura K., Ushirone S., Koyanagi T., Hikita M. PDIV characteristics of twisted-pair of magnet wires with repetitive impulse voltage. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Ins.* Chicago, June 2007. Vol. 14, no. 3, pp. 744–750.
5. *GOST IEC 60851–5-2011. Provoda obmotochnye. Metody ispytaniy. Ch. 5. Elektricheskie svoystva* [Magnet wires. Test methods. P. 5. The electrical properties]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 19 p.
6. *IEC 60851–5:1996 Methods of test winding wires. P. 5: Electrical properties*. Available at: <http://www.cntd.ru/assets/files/upload/240713/60851-5-2011.pdf> (accessed 08 February 2016).
7. Pokholkov Yu.P., Besperstov P.P., Pykhtin V.V. *Issledovanie vliyaniya tekhnologicheskogo protsessa izgotovleniya obmotok na defektnost vikhovoy izolyatsii asinkhronnykh dvigateley* [Study of the influence of technological process of manufacturing the windings on the deficiency of turn insulation of induction motors]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute*, 1975, vol. 222, pp. 52–65.
8. Borisenko A.I., Kostikov O.N., Yakovlev A.I. *Okhlazhdenie promyshlennykh elektricheskikh ustanovok* [Cooling of industrial electric machines.] Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 296 p.
9. Smirnov G.V. *Nadezhnost izolyatsii obmotok elektrotekhnicheskikh izdeliy* [Reliability of winding insulation in electrical products]. Tomsk, Tomsk State University Press, 1990. 192 p.
10. Smirnov G.V., Khasanov O.L., Smirnov D.G., Polisadov V.I., Petukevich M.S., Ponamarev S.A. Thermal properties magnetodielectrics composition based on the compound KP-34, and ultrafine Nickel-zinc powder. *Izvestiya vuzov. Physics*, 2015, vol. 58, no. 6/2, pp. 291–296. In Rus.
11. Kondratyuk A.A., Matrenin S.V., Nedosekova A.Yu. Study of the influence of amount of filler on the mechanical characteristics of the composite polymers. *Izvestiya vuzov. Physics*, 2015, vol. 57, no. 9/3, pp. 98–102. In Rus.
12. Kondrateva G.N., Kuznetsov I.N. *Sravnitel'naiya otsenka koefitsientov zapolneniya paza propitochnym sostavom, opredelennykh razlichnymi metodami* [Comparative evaluation of the factor of a groove filling with impregnating composition defined by different methods]. *Technology of electrical production*, 1981, no.12, pp. 14–16.
13. Dudkin A.N. *Razrabotka metodov otsenki tekhnologicheskogo protsessa propitki obmotok asinkhronnykh dvigateley*. Dis. Kand. Nauk [Development of methods for evaluating winding impregnation of in induction motors. Cand. Diss.]. Tomsk, 1980. 163 p.
14. Smirnov G.V., Smirnov D.G. *Sposob opredeleniya koefitsienta propitki obmotok elektricheskikh mashin* [Method for determining

- the coefficient of impregnation of windings of electrical machines]. Author certificate, the USSR, no. 1241361, 1986.
15. Smirnov G.V., Smirnov D.G. *Sposob opredeleniya koeffitsienta propitki otverzhdaemym polimernym sostavom obmotok elektricheskikh mashin* [Method of determining the coefficient of winding impregnation with curable polymer composition in electrical machines]. Patent RF, no. 2521439, 2014.
 16. Prasad A., Prasad K. Effective permittivity of random composite media: a comparative study. *Physica*, 2007, vol. 396, pp. 132–137.
 17. Chandrasekera T.C., Li Y., Moody D., Schnellmann M.A., Dennis J.S., Holland D.J. Measurement of bubble sizes in fluidised beds using electrical capacitance tomography. *Chemical Engineering Science*, 2015, vol. 126, pp. 679–687.
 18. Barber P., Balasubramanian S., Anguchamy Y., Gong S., Wibowo A., Gao H., Ploehn H., Loye H. Dielectric Materials for Pulse Power Energy Storage. *Materials*, 2009, vol. 2, pp. 1697–1733.
 19. Tareev B.M. *Fizika dielektricheskikh materialov* [Physics of dielectrics]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 328 p.
 20. Kanuta Musataka, Hakamada Taheschi, Kana Ikusi. Function tests for induction motor insulation. *Hitachi Review*, 1975, vol. 21, no. 11, pp. 436–443.
 21. Novitskiy P.V., Zograf I.A. *Otsenka pogreshnostey rezultatov izmereniy* [Estimation of errors of measurement results]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1985. 248 p.
 22. Xiaoming Ye, Xuebin Xiao, Junbo Shi, Mo Ling. The new concepts of measurement error theory. *Measurement*, 2016, vol. 83, pp. 96–105.

Received: 13 February 2016.

Information about the authors

Gennadiy V. Smirnov, Dr. Sc., professor, director, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.
Dmitriy G. Smirnov, Cand. Sc., senior researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

УДК 621.314.632:572:472.001.5

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ПОИСКА ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ПОВЫШАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ИНВЕРТОРА

Русскин Виктор Александрович¹,
vrsskn@gmail.com

Семёнов Сергей Михайлович¹,
ssm@tpu.ru

Диксон Роберт Кристофер^{1,2},
robert_dixon@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 640034, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Отдел энергетики ЮНЕСКО Карибского бассейна, Ямайка.

Актуальность работы определяется необходимостью повышения показателей энергоэффективности силовых преобразовательных устройств для нужд альтернативной энергетики. В настоящее время всё больше внимания уделяется альтернативным источникам энергии, в том числе солнечной энергетике, в связи ростом цен на невозобновляемые источники энергии. Однако генерирование солнечной энергии имеет ряд проблем, связанных со стоимостью фотопанелей, их утилизацией и несовершенством устройств преобразования энергии этих систем. Всё это требует создания источников питания на современной элементной базе и систем их управления, позволяющих достигать высоких показателей энергоэффективности. Для решения этих задач выбран метод поиска точки максимальной мощности повышающего преобразователя напряжения для солнечных источников энергии с использованием известных алгоритмов поиска.

Цель работы: исследование различных алгоритмов поиска точки максимальной мощности для систем на основе солнечных батарей; разработка структуры с наилучшими показателями коэффициента полезного действия и быстродействия на основе рассмотренных типовых схем преобразования энергии солнечных батарей и алгоритмов их управления; создание физического макета конечного устройства и оценка его показателей.

Методы исследования: обзор литературных источников по типовым схемам преобразователей энергии солнечных батарей на основе DC-DC конвертеров и алгоритмам поиска точки максимальной мощности, сравнительный анализ имеющихся данных с использованием средств компьютерного моделирования. Используются как методы имитационного моделирования с помощью программы Matlab/Simulink, так и макетирование с проведением соответствующих экспериментов: настройка ПИ-регулятора, имитация различных уровней затемнения солнечной батареи, оценка коэффициента полезного действия преобразователя.

Результаты. Разработаны имитационные модели для метода возмущения и наблюдения (адаптивного и неадаптивного) и метода возрастающей проводимости, а также проведено исследование их применений для различных уровней освещённости. Составлено программное обеспечение для микропроцессорной системы управления двухфазным повышающим преобразователем напряжения, и проведен ряд опытов по имитации различных уровней освещённости солнечной батареи для оценки коэффициента полезного действия экспериментальной установки. В работе получены показатели точности нахождения точки максимальной мощности до величины, равной 99 %, для варианта с адаптивным алгоритмом изменения шага. При экспериментальном исследовании достигнуты аналогичные показатели точности, соответствующие 95–96 %, при времени квантования 10 мс (для неадаптивного алгоритма возмущения и наблюдения).

Ключевые слова:

Отслеживание точки максимальной мощности, метод возмущения и наблюдения, метод возрастающей проводимости, повышающий преобразователь напряжения, преобразователи энергии солнечных батарей.

Введение

Авторами были проведены исследования устройства на основе повышающего преобразователя (ППН), входящего в состав структуры инвертора для солнечных батарей как наиболее перспективного по массогабаритным показателям и КПД. Функциональная схема такой системы изображена на рис. 1 [1].

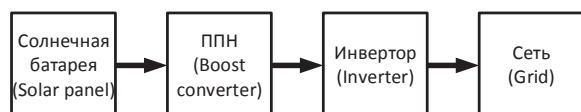


Рис. 1. Функциональная схема инвертора солнечных батарей

Fig. 1. Chain diagram of an off-line electric power supply system based on solar batteries

Для расширения диапазона работы солнечного инвертора в качестве промежуточного звена между солнечной батареей (СБ) и сетевым инвертором используется преобразователь постоянного напряжения, который также может производить отслеживание точки максимальной мощности (maximum power point tracking – MPPT), его структурная схема приведена на рис. 2. В качестве такого преобразователя энергии могут выступать понижающий, повышающий, инвертирующий преобразователи или преобразователь, выполненный по схеме Кука. Подобные схемы обеспечивают высокий КПД за счёт снижения количества силовых элементов, при этом массогабаритные показатели фильтра минимизируются высокими частотами

преобразования. Одним из основных способов повышения энергетической эффективности фотоэлектрических установок является реализация режима отбора максимума мощности в соответствующей точке вольт-амперной характеристики (ВАХ) солнечной батареи. На рис. 3 даны примеры ВАХ и вольт-ваттных характеристик (ВВХ) фотоэлектрической панели КСМ-160 [2].

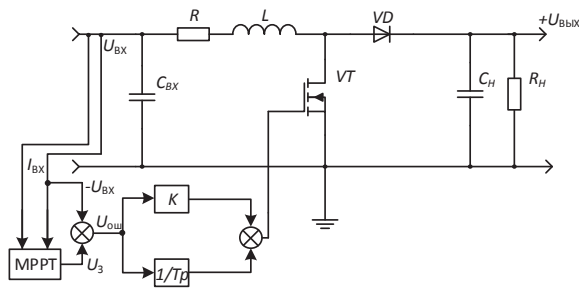


Рис. 2. Структура преобразователя энергии солнечных батарей

Fig. 2. Electrical diagram of a boost DC-DC converter

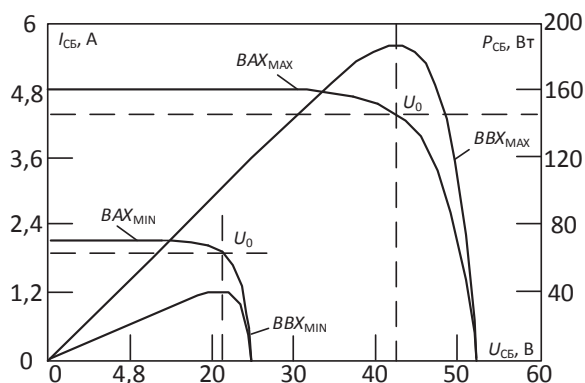


Рис. 3. ВАХ и ВВХ солнечной панели КСМ-160

Fig. 3. Characteristics of the solar panel KSM-160

Типовые схемы преобразователей энергии солнечных батарей изображены на рис. 4. Самым распространённым вариантом является понижающий преобразователь (рис. 4, а). Преимущество схемы – стабильный ток заряда аккумулятора, обеспечиваемый большой выходной индуктивностью, однако прерывистое импульсное потребление входного тока требует установки громоздкого С-фильтра [3].

Повышающий преобразователь (рис. 4, б) имеет на выходе дроссель, обеспечивающий непрерыв-

ность входного тока и стабильность рабочей точки ВАХ по току. При этом происходит увеличение напряжения на всем диапазоне регулирования, что приводит к необходимости использования байпаса для предотвращения превышения выходного напряжения. Учитывая топологию функциональной схемы конечного устройства (рис. 1), наиболее приемлемым вариантом является использование именно этого схемного решения. Из всех приведенных типов преобразователей самым высоким КПД обладает ППН.

Для успешного регулирования точки максимальной мощности ВАХ при любом соотношении напряжений на СБ и нагрузке также можно использовать преобразователь Кука, имеющий входной каскад на основе повышающего преобразователя, а выходной – на основе понижающего (рис. 4, в) [1].

Обзор существующих алгоритмов управления

Для оптимизации выходной мощности фотомодулей, как правило, используется один из известных алгоритмов. В некоторых устройствах для отслеживания точки максимальной мощности реализуют несколько алгоритмов (рис. 5), и переключения между ними осуществляются в зависимости от условий работы. Основными средствами алгоритмизации МРРТ являются: метод возмущения и наблюдения (рис. 5, а), методы возрастающей проводимости (рис. 5, б) и постоянного напряжения [4].

При использовании метода возмущения и наблюдения устройство на небольшую величину изменяет эквивалентное входное сопротивление преобразователя (путём варьирования скважности силового ключа или изменения задания на входные величины напряжения, тока или мощности), вследствие чего варьируется напряжение на СБ и далее производится измерение её выходных параметров. Если мощность увеличивается – контроллер продолжает изменять задающий параметр в этом же направлении, пока мощность не перестанет возрастать. Данный метод является наиболее распространённым, несмотря на то что он приводит к колебаниям мощности. Широкое применение этого метода обусловлено его простотой и может быть реализовано на основе функциональной схемы системы управления ППН, приведенной на рис. 6 [5].

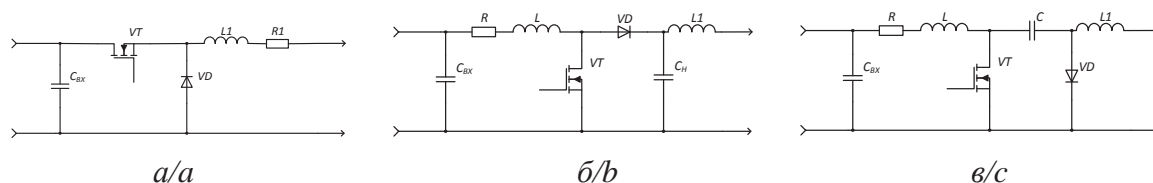


Рис. 4. Типовые схемы ПЭСБ: а) понижающий; б) повышающий; в) преобразователь Кука

Fig. 4. Typical circuits of DC-DC converters: a) buck; b) boost; c) Cuk converter

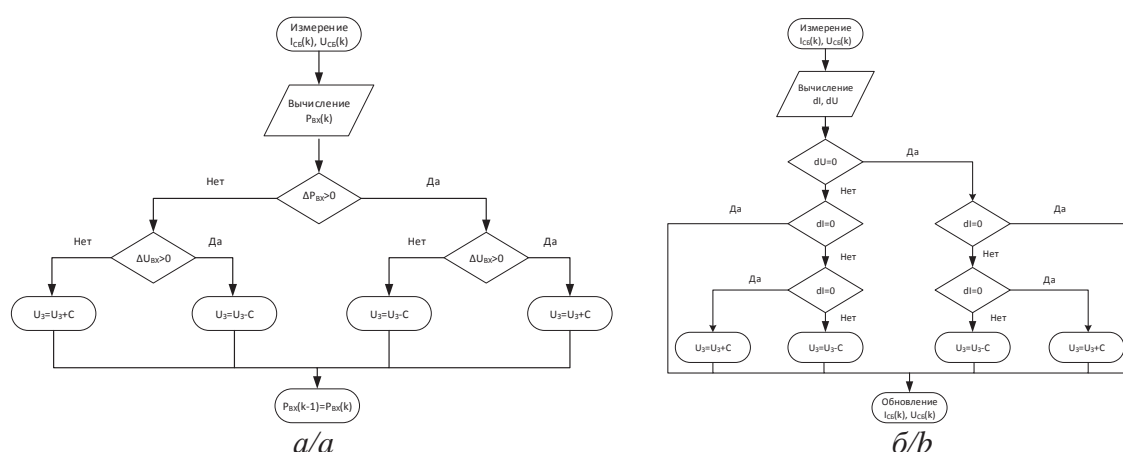


Рис. 5. Блок-схемы алгоритмов отслеживания точки максимальной мощности методом: а) возмущения и наблюдения; б) возрастающей проводимости

Fig. 5. Block diagram of algorithms of MPPT by: a) perturbation and observation; b) increasing conductance

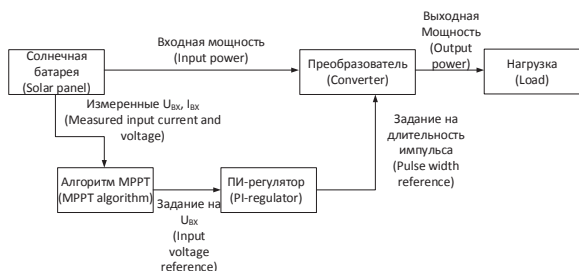


Рис. 6. Функциональная схема системы управления ППН

Fig. 6. Chain diagram of a boost DC-DC converter control system

В методе возрастающей проводимости преобразователь фиксирует увеличение тока и напряжения СБ, чтобы предсказать эффект от изменения напряжения. Он требует увеличения вычислений микроконтроллером, но при этом отслеживает изменение окружающих условий с большей скоростью, чем предыдущий метод. Однако этот способ

так же приводит к колебаниям мощности. Рассматриваемый метод использует возрастающую проводимость dI/dU солнечной батареи для вычисления знака изменения мощности по отношению к напряжению dP/dU . При этом вычисляется точка максимальной мощности и производится сравнение возрастающей проводимости $\Delta I/\Delta U$ с проводимостью СБ (I/U). При выполнении условия $\Delta I/\Delta U = I/U$ выходное напряжение равно напряжению, соответствующему наибольшему значению мощности. Уставка ПИ-регулятора по напряжению поддерживается пока не изменится уровень освещённости, далее процесс повторяется.

Результаты моделирования

На рис. 7 представлена имитационная модель системы отслеживания точки максимальной мощности. В модели преобразователь заменён переменным сопротивлением, величина которого регулируется динамически с помощью одного из алгоритмов MPPT.

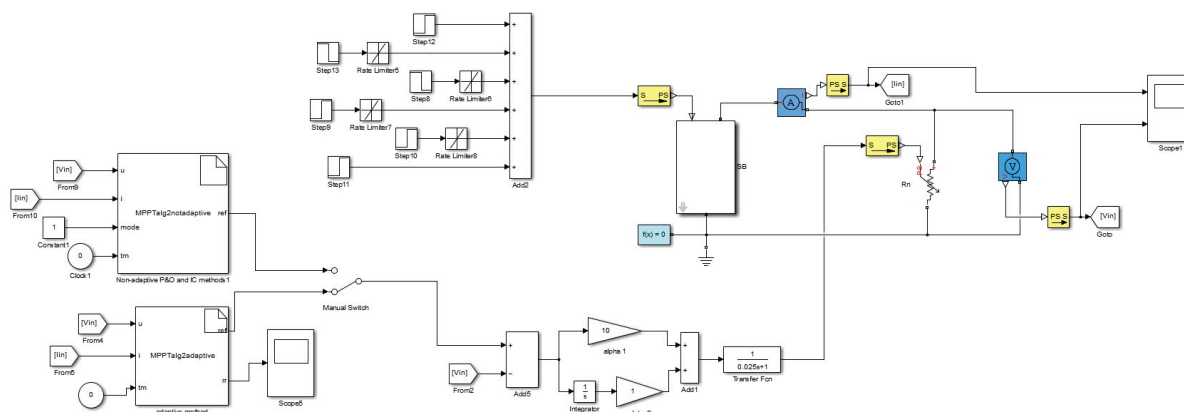


Рис. 7. Имитационная модель для отладки алгоритмов MPPT

Fig. 7. Simulation model for adjustment of MPPT algorithms

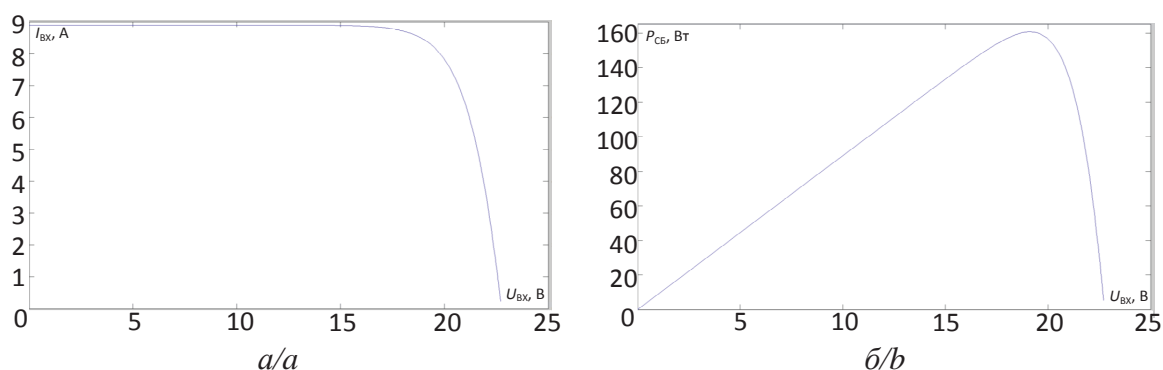


Рис. 8. Характеристики модели СБ: а) ВАХ; б) ВВХ

Fig. 8. Characteristics of solar panel: a) current voltage; b) power voltage

При построении имитационной модели приняты следующие допущения:

- не учитывается широтно-импульсная модуляция (преобразователь представлен эквивалентным сопротивлением), т. к. время квантования алгоритма отслеживания точки максимальной мощности существенно выше периода ШИМ;
- инерционность преобразователя при реагировании на изменение входного напряжения представлена апериодическим звеном.

На рис. 8 приведены ВАХ и ВВХ модели СБ, используемой при моделировании.

В результате имитационного моделирования получены графики выхода на рабочую точку и отыскания новых максимумов мощности при изменении величины освещённости фотомодуля. На рис. 9 представлены диаграммы тока (I_{BX}), напряжения (U_{BX}) и мощности солнечной батареи (P_{CB}) для неадаптивного алгоритма возмущения и наблюдения с максимальным шагом по напряжению.

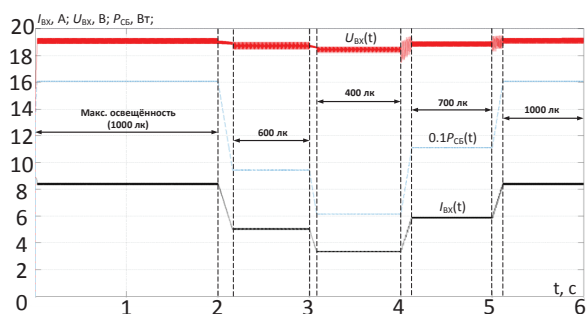


Рис. 9. Диаграммы тока, напряжения и мощности СБ для неадаптивного алгоритма возмущения и наблюдения с максимальным шагом

Fig. 9. Current, voltage and power diagrams of solar panel for non-adaptive perturbation and observation method with maximum step

На рис. 10 изображены аналогичные временные диаграммы для неадаптивного алгоритма возмущения и наблюдения с минимальным шагом по напряжению.

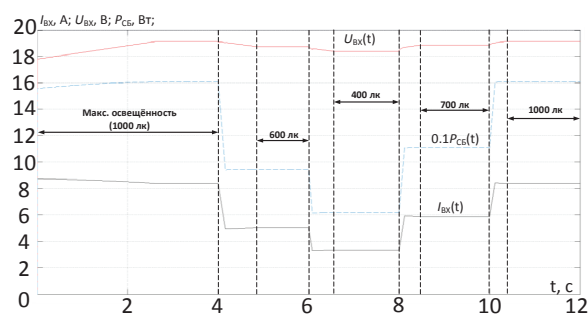


Рис. 10. Диаграммы тока, напряжения и мощности СБ для неадаптивного алгоритма возмущения и наблюдения с минимальным шагом

Fig. 10. Current, voltage and power diagrams of solar panel for non-adaptive perturbation and observation method with minimum step

Адаптивный алгоритм реализован следующим образом: при последовательном движении текущей рабочей точки в одну сторону увеличивается и шаг приращения задания на входное напряжение на каждой итерации; если на предыдущем шаге мощность увеличилась, а на текущем – уменьшилась, то при этом шаг приращения уменьшается. На рис. 11 даны временные диаграммы тока, напряжения и мощности для адаптивного алгоритма возмущения и наблюдения.

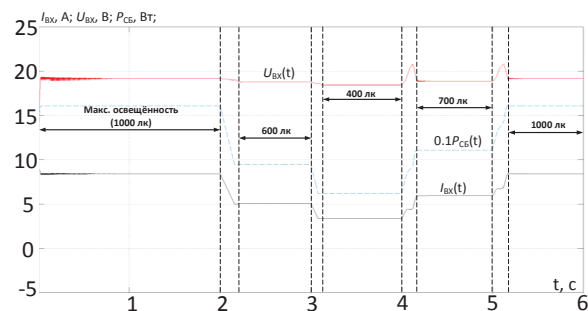


Рис. 11. Диаграммы тока, напряжения и мощности СБ для адаптивного алгоритма возмущения и наблюдения

Fig. 11. Current, voltage and power diagrams of solar panel for adaptive perturbation and observation method

На рис. 12 приведены графики работы системы по алгоритму возрастающей проводимости.

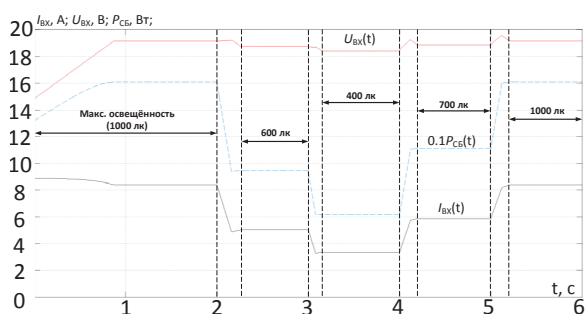


Рис. 12. Диаграммы тока, напряжения и мощности СБ для алгоритма возрастающей проводимости

Fig. 12. Current, voltage and power diagrams of solar panel for incrementing conductance method

Рассмотренные алгоритмы нацелены в первую очередь на отыскание локальных максимумов мощности СБ. Все они предполагают колебания мощности, которые могут быть снижены с помощью введения алгоритмов изменения шага, один из которых (адаптивный, возмущения и наблюдения) описан выше. Алгоритм возрастающей проводимости гораздо быстрее обрабатывает изменения освещённости, однако для корректной работы необходимо производить больше арифметических операций на каждом такте его работы. К недостаткам данного метода также можно отнести высокую чувствительность к помехам и изменению шага.

Экспериментальные исследования

Опыты проводились с использованием звена постоянного тока инвертора солнечных батарей, представляющего собой два параллельно включенных повышающих преобразователя напряжения. Фото печатной платы данного типа преобразователя представлено на рис. 13.

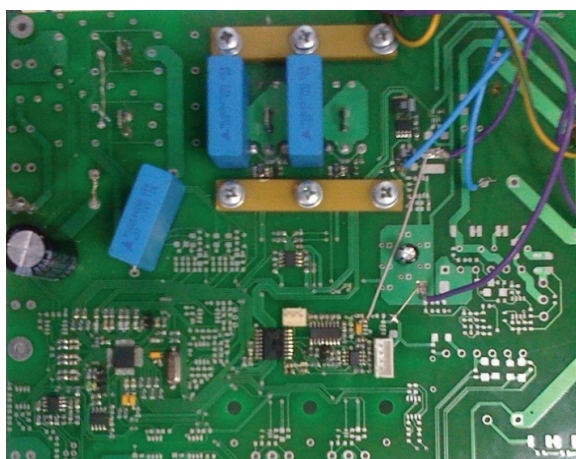


Рис. 13. Фото печатной платы ППН

Fig. 13. Photo of DC-DC boost converter print circuit board

Для получения нелинейной ВАХ использовался лабораторный источник питания GW Instek

PSP-603. Этот тип источника позволяет получить вольт-амперные характеристики, представленные на рис. 14.

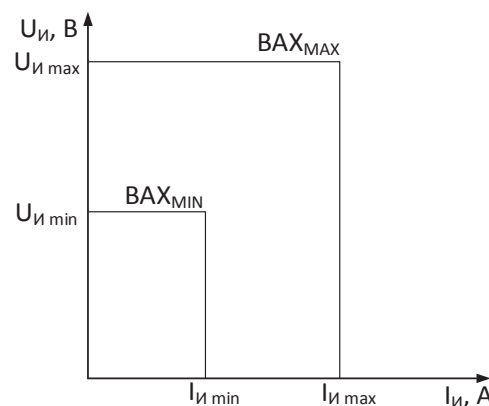


Рис. 14. ВАХ источника питания

Fig. 14. Current voltage characteristic of a power source

Для получения наиболее близких по форме ВАХ и ВВХ к соответствующим характеристикам СБ было реализовано последовательное и параллельное подключение сопротивлений между источником питания и ППН. Опытные вольт-амперные $U=f(I)$ и вольт-ваттные $P=f(I)$ характеристики изображены на рис. 15.

В табл. 1 приведены значения входных токов и напряжений, соответствующих точкам максимальной мощности для каждой вольт-амперной характеристики вышеприведенного рисунка.

Таблица 1. Входные токи и напряжения для каждой ВАХ

Table 1. Input currents and voltages for each characteristic

| № характеристики Characteristic | I_{max} , А | U_{max} , В | P_{max} , Вт |
|------------------------------------|---------------|---------------|----------------|
| 1 | 0,9 | 13 | 11,687 |
| 2 | 0,72 | 10,41 | 7,49 |
| 3 | 0,6 | 8,66 | 5,17 |
| 4 | 0,42 | 6,12 | 2,55 |
| 5 | 0,3 | 4,4 | 1,24 |

В рассматриваемом алгоритме возмущение реализуется через изменение задания на входное напряжение преобразователя, которое обрабатывается ПИ-регулятором. Осциллограммы обработки этого процесса приведены на рис. 16.

Частота вызова алгоритма МРРТ выбиралась исходя из динамических свойств замкнутой системы управления. Из данных осциллограмм видно, что время переходного процесса входного напряжения равняется 10 мс. В соответствии с этим частота вызова алгоритма МРРТ выбирается не выше 100 Гц [5–7].

На рис. 17 приведена осциллограмма работы алгоритма при запуске и переходе между характеристиками источника питания.

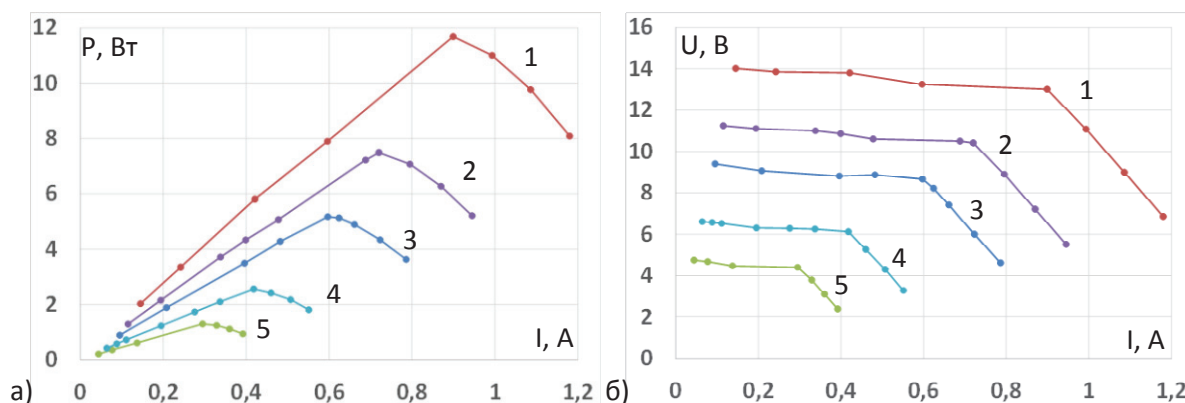


Рис. 15. Характеристики нелинейного источника питания: а) ВВХ $P=f(I)$; б) ВАХ $U=f(I)$

Fig. 15. Characteristics of non-linear power source: а) power voltage characteristic $P=f(I)$; б) current voltage characteristic $U=f(I)$

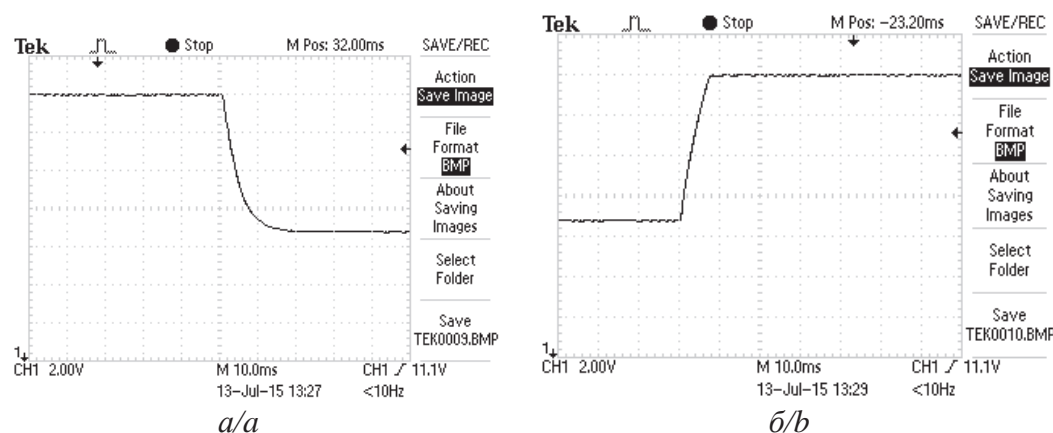


Рис. 16. Осциллограммы отработки системой задания на уменьшение (а) и увеличение (б) входного напряжения

Fig. 16. Oscillograms of operation of reference for reduction (а) and increase (б) of input voltage

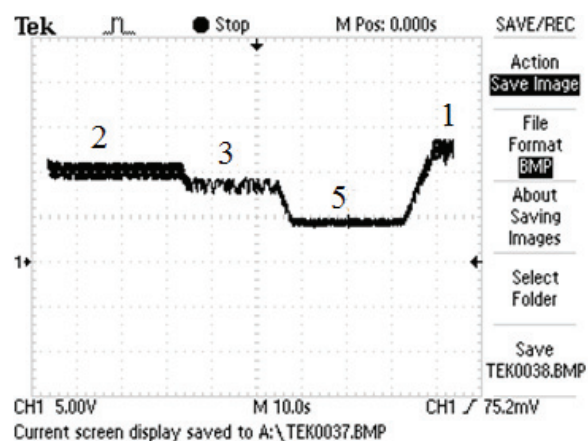


Рис. 17. Осциллограмма работы алгоритма при имитации изменения освещённости

Fig. 17. Oscillogram of algorithm functioning when simulating illumination changes

На данном рисунке цифрами обозначена работа ППН на соответствующих ВАХ (рис. 7, табл. 1).

Проведен расчёт точности нахождения точки максимальной мощности на каждой рабочей точ-

ке. Приводится пример определения мощности для характеристики 2:

$$P_{\max} = U_{\max} I_{\max} = 10,41 \cdot 0,72 = 7,49 \text{ Вт},$$

$$P'_{\max} = U' I' = 11,34 \cdot 0,64 = 7,26 \text{ Вт},$$

где I_{\max} , U_{\max} и P_{\max} – максимальные значения тока, напряжения и мощности для каждой ВАХ источника; I' , U' и P'_{\max} – установившиеся в результате работы алгоритма значения тока, напряжения и мощности на выходе источника, определённые экспериментально.

Далее вычисляется точность:

$$\frac{P'_{\max}}{P_{\max}} 100 \% = \frac{7,26}{7,49} 100 \% = 96,93 \%$$

Результаты расчетов для работы системы на каждой ВАХ (рис. 15) приведены в табл. 2.

Из рассмотренного видно, что потери мощности связаны в первую очередь с колебаниями задания на входное напряжение (рис. 18, а). Их можно избежать, если использовать адаптивный алгоритм изменения шага возмущения по мере приближения к отслеживаемой точке (рис. 18, б). При испытании адаптивного алгоритма точность составила 98–99 % [8, 9].

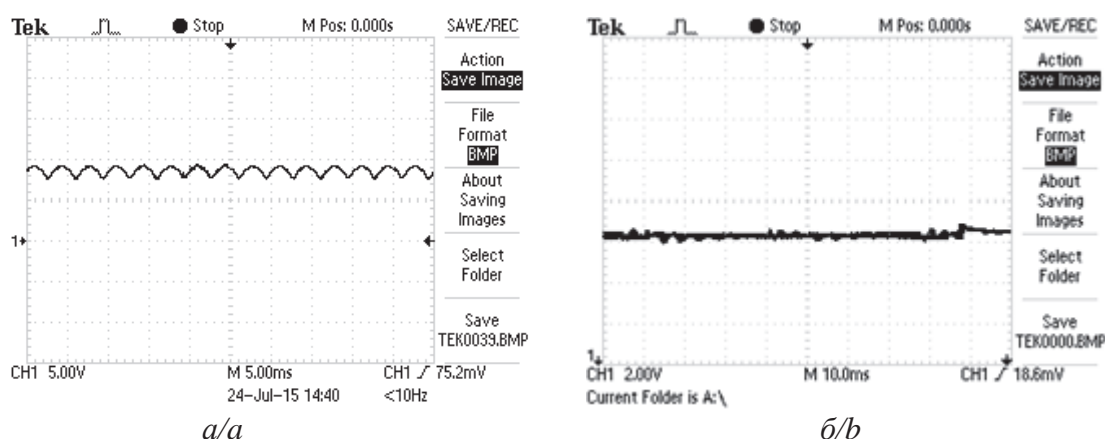


Рис. 18. Осциллограммы колебания входного напряжения источника при работе алгоритмов: а) неадаптивного; б) адаптивного
Fig. 18. Oscillogram of input voltage source pulsations for: a) non-adaptive; b) adaptive algorithm

Таблица 2. Точность нахождения точки максимальной мощности для различных уровней освещённости

Table 2. Accuracy of tracking maximum power point for different levels of illumination

| Обозначение интервала Interval | Точность, % Accuracy, % |
|-----------------------------------|----------------------------|
| 2 | 96,93 |
| 3 | 95,8 |
| 5 | 95,2 |
| 1 | 95,73 |

Заключение

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- Достигнутое значение точности нахождения точки максимальной мощности (95–96 %) при

работе неадаптивного алгоритма возмущения и наблюдения удовлетворяет теоретическим и экспериментальным данным отечественных и зарубежных исследователей [1, 5–20].

- Для увеличения точности (до 99 %) экстремального регулирования мощности наиболее приемлем алгоритм изменения шага регулируемого параметра (ток, напряжение, мощность СБ или скважность ключа) при определении максимума мощности.
 - Метод возмущения и наблюдения является наилучшим, поскольку менее требователен к ресурсам микроконтроллера и при реализации адаптивного алгоритма обеспечивает высокий уровень точности, сочетающийся с достаточным быстродействием.
6. Ting-Chung Yu, Yu-Cheng Lin. A study on maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems // Lunghwa University of Science and Technology. 2012. URL: <https://www.lhu.edu.tw/m/oa/synthetic/publish/publish/30/4.%E4%BD%99%E5%AE%9A%E4%B8%AD-A%20Study%20on%20Maximum%20Power%20Point%20Tracking%20Algorithms%20for%20Photovoltaic%20Systems.pdf> (дата обращения: 20.12.2015).
 7. Saurav Stopathy. Photovoltaic power control using MPPT and boost converter // National Institute of Technology Rourkela. 2012. URL: http://ethesis.nitrkl.ac.in/3510/1/PHOTOVOLTAIC_POWER_CONTROL_USING_MPPT_AND_BOOST_CONVERTER.pdf (дата обращения: 20.12.2015).
 8. Divya Teja Reddy Challa, Raghavendar I. Implementation of Incremental Conductance MPPT with Direct Control Method Using Cuk Converter // International Journal of modern engineering research. – 2012. – V. 2. – Iss. 6. – P. 4491–4496.
 9. Improved MPPT algorithms for rapidly changing environmental conditions / Dezso Sera, Tamas Kerekes, Remus Teodorescu, Frede Blaabjerg // Power Electronics and Motion Control Conference: 12th International Conference (EPE/PEMC 2006). – Portoroz, 2006. – V. 1. – P. 1614–1619.
 10. Samer Alsadi, Basim Alsaid. Maximum power point tracking simulation for photovoltaic systems using perturb and observe al-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сопоставительный анализ энергетической эффективности преобразования энергии солнечной батареи преобразователями постоянного напряжения / А.В. Осипов, Ю.А. Шурыгин, Ю.А. Шиняков, А.И. Отто, М.М. Черная // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2013. – Т. 27. – № 1. – С. 14–19.
2. Характеристики фотоэлектрического модуля КСМ-160 // ОАО НПФ «Квант», 2013. URL: www.rusnanonet.ru/download/nano/file/ksm160.pdf (дата обращения: 20.12.2015).
3. Manimekalai P., Harikumar R., Raghavan S. A Hybrid Maximum Power Point Tracking with Interleaved Converter for Standalone Photovoltaic Power Generation System // International Energy Journal. – 2014. – V. 14. – Iss. 12. – P. 143–154.
4. Pradeep Kumar Yadav A., Thirumaliah S., Haritha G. Comparison of MPPT Algorithms for DC-DC converters based PV systems // Directory of open access journals. 2013. URL: <https://doaj.org/article/10517792b1d843e9b69779fb5560a214> (дата обращения: 20.12.2015).
5. Moring S., Pols A. Maximum Power Point Tracking: Algorithm and Software Development // Delft University of Technology. 2012. URL: <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3Aceb32d5b-985a-4684-ab14-84888f0b1b11/> (дата обращения: 20.12.2015).

- gorithm // International journal of engineering and innovative technology. – 2012. – V. 2. – Iss. 6. – P. 80–85.
11. Implementation of PIC-based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System / Adel A. Elbaset, Ahmed Emad-El-din Hussein, Ayman Brisha, Ramadan Mahmoud Mostafa // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – 2014. – V. 4. – Iss. 5. – P. 392–401.
 12. Raju D., Ranga Rajan S. Simulation and hardware implementation of change in conductance MPPT controller for a solar photovoltaic system using Cuk converter // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2013. – V. 2. – Iss. 7. – P. 188–195.
 13. Sreekumar A.V., Arun Rajendren. MPPT of PV arrays under partial shading condition using SEPIC converter // International journal of Research in Engineering and Technology. – 2014. – V. 3. – Iss. 7. – P. 398–404.
 14. Comprehensive analysis of maximum power point tracking techniques in solar photovoltaic systems under uniform insolation and partial shaded condition / Deepak Verma, S. Nema, A.M. Shandilya, Soubhagya K. Dash // Journal of Renewable and Sustainable Energy. 2015. URL: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jrse/7/4/10.1063/1.4926844> (дата обращения: 20.12.2015).
 15. Saleh Elkhalani Babaa, Armstrong M., Pickert V. Overview of Maximum Power Point Tracking Control Methods for PV Systems // Journal of Power and Energy Engineering. – 2014. – V. 2. – Iss. 8. – P. 59–71.
 16. Wei Guo, Dong-mei-Zhao. The Maximum Power Tracking Method and Reactive Compensation Simulation Research Based on DIGSILENT // Energy and Power Engineering. – 2013. – V. 5. – Iss. 4. – P. 398–403.
 17. Mohammed El Alami, Mohamed Habibi, Seddik Bri. Modeling the Chain of Conversion for a PV System // Smart Grid and Renewable Energy. – 2014. – V. 5. – Iss. 10. – P. 239–248.
 18. Areen Abdallah Allataifeh, Khaled Batatineh, Mohamad Al-Khedher. Maximum Power Point Tracking Using Fuzzy Logic Controller under Partial Conditions // Smart Grid and Renewable Energy. – 2015. – V. 6. – Iss. 1. – P. 1–13.
 19. Solar Energy: Trends and Enabling Technologies / V. Devabhaktuni, M. Alam, S.S.S. Reddy Depuru, II R.C. Green, D. Nims, C. Near // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – V. 19. – Iss. 3. – P. 555–556.
 20. Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems / V. Salas, E. Olias, A. Barrado, A. Lazaro // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2006. – V. 90. – Iss. 11. – P. 1555–1578.

Поступила 29.01.2016 г.

Информация об авторах

Русскин В.А., магистрант Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Семёнов С.М., старший преподаватель кафедры электропривода и электрооборудования Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Диксон Р.К., ассистент кафедры электропривода и электрооборудования Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета; специалист отдела энергетики ЮНЕСКО Карибского бассейна, Ямайка.

UDC 621.314.632:572:472.001.5

STUDY OF ALGORITHMS FOR TRACKING MAXIMUM POWER POINT FOR BOOST DC-DC CONVERTER OF SOLAR INVERTER

Viktor A. Russkin¹,
vrsskn@gmail.com

Sergey M. Semenov¹,
ssm@tpu.ru

Robert C. Dixon^{1,2},
robert_dixon@mail.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 640034, Russia

² Energy Division Specialist of UNESCO Caribbean, Jamaica.

The relevance of the discussed issue is caused by the need to improve energy efficiency of DC-DC power converting devices for needs of alternative power engineering. Nowadays the increasing attention is paid to alternative energy sources such as solar power. This is caused by increase in price for non-renewable energy sources. However, generation of solar energy has a number of problems related to the cost of photovoltaic panels, their utilization and imperfections of devices of energy conversion of these systems. All these issues demand the development of power supplies on modern element base and their control systems which allow reaching high rates of energy efficiency. To achieve these aims the authors have used the known methods of tracking maximum power point.

The main aim of the study is to research various maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems; to develop the system with the best efficiency and high-speed performance and physical model of the final device and to estimate its efficiency.

The methods used in the study: reviewing of technical publications concerning maximum power point tracking algorithms; simulation modeling using Matlab/Simulink and certain experiments with a prototype of two-phase DC-DC boost converter. The experiments and modeling includes: setup of PI-regulator, imitation of various levels of blackout of a solar battery, assessment of efficiency of the converter.

The results. The authors developed the simulation models for adaptive and non-adaptive perturbation and the observation and incremental conductance method and studied their application for different levels of illumination. The software for a microprocessor control system was designed. The authors carried out the experiments in simulation of different levels of illumination of the solar battery to estimate the efficiency of the device. The research demonstrates high value of maximum power point tracking efficiency (99 %) for option with adaptive algorithm of a step change. At the experiment the similar indicators of accuracy (95–96 %) were obtained, at quantization time of 10 ms (for not adaptive algorithm of perturbation and observation).

Key words:

Maximum power point tracking, perturbation and observation method, incrementing conductance method, boost DC-DC converter, energy converter of solar batteries.

REFERENCES

- Osipov A.V., Shurigin Yu.A., Shinyakov Yu.A., Otto A.I., Chernaya M.M. Comparative analysis of effectiveness of solar battery energy transformation by DC-DC converters. *Proceedings of Tomsk State University of Control systems and Radioelectronics*, 2013, vol. 27, Iss. 3, pp. 14–19. In Rus.
- Kharakteristiki fotoelektricheskogo modulya KSM-160 [Characteristics of photovoltaic module KSM-160]. *Kvant Ltd*. 2013. Available at: www.rusnanonet.ru/download/nano/file/ksm160.pdf (accessed 20 December 2015).
- Manimekalai P., Harikumar R., Raghavan S. A Hybrid Maximum Power Point Tracking with Interleaved Converter for Standalone Photovoltaic Power Generation System. *International Energy Journal*, 2014, vol. 14, Iss. 12, pp. 143–154.
- Pradeep Kumar Yadav A., Thirumaliah S., Haritha G. Comparison of MPPT Algorithms for DC-DC converters based PV systems. *Directory of open access journals*. 2013. Available at: <https://doaj.org/article/10517792b1d843e9b69779fb5560a214> (accessed 20 December 2015).
- Moring S., Pols A. Maximum Power Point Tracking: Algorithm and Software Development. *Delft University of Technology*. 2012. Available at: <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3Aceb32d5b-985a-4684-ab14-84888f0b1b11/> (accessed 20 December 2015).
- Ting-Chung Yu, Yu-Cheng Lin. A study on maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems. *Lunghwa University of Science and Technology*. 2012. Available at: <https://www.lhu.edu.tw/m/oa/synthetic/publish/publish/30/4.%E4%BD%99%E5%AE%9A%E4%B8%AD-A%20Study%20on%20Maximum%20Power%20Point%20Tracking%20Algorithms%20for%20Photovoltaic%20Systems.pdf> (accessed 20 December 2015).
- Saurav Stapathy. Photovoltaic power control using MPPT and boost converter. *National Institute of Technology Rourkela*. 2012. Available at: http://ethesis.nitrkl.ac.in/3510/1/PHOTOVOLTAIC_POWER_CONTROL_USING_MPPT_AND_BOOST_CONVERTER.pdf (accessed 20 December 2015).
- Divya Teja Reddy Challa, Raghavendar I. Implementation of Incremental Conductance MPPT with Direct Control Method Using Cuk Converter. *International Journal of modern engineering research*, 2012, vol. 2, Iss. 6, pp. 4491–4496.
- Dezso Sera, Tamas Kerekes, Remus Teodorescu, Frede Blaabjerg. Improved MPPT algorithms for rapidly changing environmental conditions. *Power Electronics and Motion Control Conference*.

- 12th International Conference (EPE/PEMC 2006). Portoroz, 2006. Vol. 1, pp. 1614–1619.
10. Samer Alsadi, Basim Alsayid. Maximum power point tracking simulation for photovoltaic systems using perturb and observe algorithm. *International journal of engineering and innovative technology*, 2012, vol. 2, Iss. 6, pp. 80–85.
 11. Adel A. Elbaset, Ahmed Emad-Eldin Hussein, Ayman Brisha, Ramadan Mahmoud Mostafa. Implementation of PIC-based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2014, vol. 4, Iss. 5, pp. 392–401.
 12. Raju D., S. Ranga Rajan. Simulation and hardware implementation of change in conductance MPPT controller for a solar photovoltaic system using Cuk converter. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2013, vol. 2, Iss. 7, pp. 188–195.
 13. Sreekumar A.V., Arun Rajendren. MPPT of PV arrays under partial shading condition using SEPIC converter. *International journal of Research in Engineering and Technology*, 2014, vol. 3, Iss. 7, pp. 398–404.
 14. Deepak Verma, S. Nema, A.M. Shandilya, Soubhagya K. Dash. Comprehensive analysis of maximum power point tracking techniques in solar photovoltaic systems under uniform insolation and partial shaded condition. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2015. Available at: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jrse/7/4/10.1063/1.4926844> (accessed 20 December 2015).
 15. Saleh Elkelani Babaa, Armstrong M., Pickert V. Overview of Maximum Power Point Tracking Control Methods for PV Systems. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2014, vol. 2, Iss. 8, pp. 59–71.
 16. Wei Guo, Dong-mei-Zhao. The Maximum Power Tracking Method and Reactive Compensation Simulation Research Based on DIGSI-LENT. *Energy and Power Engineering*, 2013, vol. 5, Iss. 4, pp. 398–403.
 17. Mohammed El Alami, Mohamed Habibi, Seddik Bri. Modeling the Chain of Conversion for a PV System. *Smart Grid and Renewable Energy*, 2014, vol. 5, Iss. 10, pp. 239–248.
 18. Areen Abdallah Allataifeh, Khaled Bataineh, Mohamad Al-Khedher. Maximum Power Point Tracking Using Fuzzy Logic Controller under Partial Conditions. *Smart Grid and Renewable Energy*, 2015, vol. 6, Iss. 1, pp. 1–13.
 19. Devabhaktuni V., Alam M., Reddy Depuru S.S.S., Green II R.C., Nims D., Near C. Solar Energy: Trends and Enabling Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 19, Iss. 3, pp. 555–556.
 20. Salas V., Olias E., Barrado A., Lazaro A. Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2006, vol. 90, Iss. 11, pp. 1555–1578.

Received: 29 January 2016.

Information about the authors

Viktor A. Russkin, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey M. Semenov, senior professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Robert C. Dixon, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University; Energy Division Specialist, UNESCO Caribbean.

УДК 532.5.013.12: 532.559.8

СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЫЛЕВОГО ОСАДКА В ЩЕЛЕВОМ ФИЛЬТРЕ

Зыкова Юлия Александровна¹,
ulya2279@mail.ru

Самохвалов Николай Митрофанович¹,
htnv@istu.edu

Виноградов Владимир Владимирович¹,
vuv158@mail.ru

¹ Иркутский национальный исследовательский университет,
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Актуальность работы. Природный газ, добываемый из скважин на месторождениях, не является товарной продукцией, так как содержит множество примесей, в том числе механических. Поэтому добытый газ направляется на установки комплексной подготовки газа, где одним из этапов технологического цикла является очистка от механических примесей. Актуальность работы обусловлена необходимостью изучения гидравлического сопротивления пылевого осадка в новом, ранее не изученном устройстве для очистки запыленных газов фильтрованием – щелевом фильтре. Существующие сегодня методы расчета прироста гидравлического сопротивления не применимы для данных пылеулавливающих устройств.

Цель исследования: проведение лабораторных испытаний щелевого фильтра с целью определения вариантов формирования осадка и их математического описания и разработка методики расчета прироста гидравлического сопротивления при очистке запыленных газов.

Методы исследования основаны на результатах физического моделирования процесса фильтрования запыленных газов с целью определения прироста гидравлического сопротивления и теоретическом анализе уравнения Дарси для механизмов образования осадка и закупоривания пор применительно к щелевому фильтру.

Результаты. Представлены теоретические зависимости по расчету гидравлического сопротивления при очистке запыленных газов в щелевом фильтре для механизмов фильтрования с образованием осадка и с закупориванием пор, полученные на основе преобразований уравнения Пуазейля. Рассмотрено сравнение расчетных данных с использованием этих уравнений с опытными данными. Показано, что сходимость опытного и расчетного прироста сопротивления по механизму с образованием осадка составляет в среднем 10 %, а по механизму с закупориванием пор наблюдалось существенное отклонение более чем в 100 %. Представлена зависимость по расчету удельного сопротивления пылевого осадка, которая в отличие от уравнений Эргана и Козени–Кармана учитывает кривизну каналов в слое пыли. Предложена математическая модель, учитывающая механизм фильтрования с образованием осадка, которая положена в основу расчета гидравлического сопротивления щелевого фильтра.

Выводы. Разработанная методика расчета позволяет с достаточной степенью точности рассчитать гидравлическое сопротивление щелевого фильтра с учетом характеристик фильтрующей перегородки и физических свойств пыли и газа в зависимости от скорости потока, продолжительности очистки и запыленности газа. Данная методика позволяет моделировать и проектировать щелевые фильтры с минимальным значением гидравлического сопротивления, что позволит снизить эксплуатационные затраты.

Ключевые слова:

Щелевой фильтр, гидравлическое сопротивление, фильтрование, закупоривание пор, образование осадка, пылеочистка.

Для очистки запыленных газов фильтрованием определен интерес представляет щелевой фильтр с простой и эффективной системой регенерации фильтрующего слоя [1]. В этом фильтре в качестве фильтрующей перегородки используется слой металлической проволоки, навитой в несколько рядов на каркас в виде «белчьего колеса» или перфорированный цилиндр. Такой фильтрующий слой обладает механической прочностью и хорошей фильтрующей способностью. Его можно использовать для высокоэффективной очистки горячих, коррозионных и абразивных сред. Известные способы очистки и аппараты не всегда пригодны к работе в таких условиях.

Очистка запыленных газов фильтрованием представляет сложный процесс, зависящий от многих факторов. Теоретический анализ и экспериментальные исследования показали, что основные закономерности, характерные для фильтрова-

ния суспензий, в целом справедливы и для газов, но при этом имеются и отличительные особенности. Обычно фильтрование газов протекает при более высоких скоростях потока и сопровождается проскоком пыли. Плотность и вязкость газового потока значительно меньше, чем у жидкости, что существенно влияет на гидродинамику процесса [2–9].

Известные методы расчета гидравлического сопротивления при фильтровании запыленных газов основываются на эмпирическом законе Дарси. Теория фильтрования построена на «идеальном» фильтре с равномерными и цилиндрическими каналами, а для оценки реальных процессов используются опытные поправки. Получение таких поправок требует тщательного эксперимента и учета многих трудно определяемых факторов. Ранее исследования гидравлического сопротивления при использовании щелевых фильтров для очистки га-

за от пыли не проводились, что составляет дополнительные трудности для оценки результатов экспериментов.

Объекты и методы исследований

Объектом исследования являлась щелевая фильтрующая перегородка со сменным числом слоев и различным диаметром проволоки. Гидравлические сопротивления измерялись микроманометром с наклонной трубкой ММН-240. Расход воздуха – с помощью ротаметра РМ-04–10 ГУЗ. Исследовалось гидравлическое сопротивление фильтра при очистке воздуха от нейтрального гипохлорита кальция, цементной, песочной и мучной пыли. Для определения размера частиц пыли и ее дисперсности использовался импактор конструкции НИИОГаз. В качестве размера частиц пыли принят медианный размер. Для характеристики сыпучести пыли использован угол естественного откоса. Плотность пыли оценивалась истинной и насыпной плотностью. Отбор проб проводился аспиратором через пылеотборные трубки [10, 11]. После каждого эксперимента фильтрующая перегородка очищалась от уловленной пыли, во время опыта регенерация не проводилась.

Методами исследований являлись экспериментальное изучение и теоретический анализ процессов фильтрования запыленных газов через фильтрующую щелевую перегородку.

Обсуждение результатов

Известно [12], что фильтрование может протекать с образованием осадка на лобовой поверхности фильтрующей перегородки или с закупориванием пор при накоплении осадка внутри каналов фильтрующего слоя. Исследование фильтрования щелевой перегородкой показало, что процесс протекает в ламинарном режиме. Начальный период фильтрования соответствует стационарному процессу фильтрования [13]. В этот период пыль осаждается как на поверхности перегородки, так и в ее каналах. При постоянной скорости фильтрования при осаждении пыли происходит непрерывное возрастание давления потока, что должно влиять на перемещение пыли внутрь щелевого слоя [14].

Прирост сопротивления при фильтровании с образованием осадка зависит не от характеристик щелевой перегородки, а от удельного сопротивления пылевого осадка. При фильтровании с постепенным закупориванием каналов щелевой перегородки на прирост сопротивления влияет уменьшение сечения щелевых каналов при накоплении в них пыли.

Если принять вариант фильтрования с образованием осадка, то в соответствии с уравнением Дарси [12, 15] гидравлическое сопротивление фильтра при улавливании пыли можно представить как сумму сопротивления чистой фильтрующей перегородки $\Delta P_{\text{ч}}$ и сопротивления слоя осадка $\Delta P_{\text{ос}}$:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{ч}} + \Delta P_{\text{ос}}. \quad (1)$$

Определение гидравлического сопротивления чистой фильтрующей щелевой перегородки рассмотрено в работе [16]. Для выяснения величины сопротивления слоя осадка при улавливании пыли в щелевом фильтре используем уравнение Пуазейля, в соответствии с которым расход газа через один канал при ламинарном течении составит [15]:

$$\frac{V}{\tau} = \frac{\pi \Delta P_{\text{ос}} d^4}{128 \mu l},$$

где V – объем фильтрата, м^3 ; τ – время, с; d – диаметр канала, м; μ – динамическая вязкость потока, Па·с; l – длина канала, м.

Это уравнение получено для условий ламинарного течения несжимаемой жидкости в прямом канале круглого сечения. Ламинарный режим в процессах фильтрования оценивается по Карману [17] критерием $Re < 20-40$, при

$$Re = \frac{W d \rho_{\text{г}}}{\mu} \frac{\varphi}{1 - \varepsilon_0},$$

где φ – фактор формы; ε_0 – доля свободного объема фильтрующей перегородки, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $\rho_{\text{г}}$ – плотность газа, $\text{кг}/\text{м}^3$; W – скорость потока в каналах, м/с.

Применительно к щелевому слою критерий Рейнольдса выразится уравнением

$$Re_{\text{щк}} = \frac{W_0 d_{\text{щ}} \rho_{\text{г}}}{\varepsilon_0 \mu} \frac{\varphi}{1 - \varepsilon_0},$$

где W_0 – фиктивная скорость потока (скорость фильтрования), м/с; $d_{\text{щ}}$ – эквивалентный диаметр каналов щелевой перегородки, м.

Применительно к пылевому осадку критерий Рейнольдса выразится уравнением

$$Re_{\text{пк}} = \frac{W_0 d_0 \rho_{\text{г}}}{m \mu} \frac{\varphi}{1 - m},$$

где d_0 – эквивалентный диаметр каналов в пылевом осадке, м; m – пористость пыли, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Для извилистого канала пылевого слоя его длина с учетом кривизны будет равна:

$$l = \xi_{\text{н}} h,$$

где $\xi_{\text{н}}$ – коэффициент извилистости канала пылевого слоя; h – толщина пылевого осадка, м.

Для стационарного периода фильтрования можно принять, что живое сечение и скорость потока в каналах фильтрующей перегородки не изменяются. Если принять пыль монодисперсной с частицами шарообразной формы и обозначить через $N_{\text{п}}$ число каналов в пылевом слое, образовавшемся на 1 м^2 фильтрующей поверхности F , то расход газа через эти каналы, в соответствии с уравнением Пуазейля, составит:

$$\frac{V}{F m \tau} = \frac{\pi \Delta P_{\text{ос}} d^4 N_{\text{п}}}{128 \mu \xi_{\text{н}} h},$$

где d – размер канала в пылевом слое, м.

Считая осадок несжимаемым, выразим толщину слоя пыли h , поступившей в каналы щелевой перегородки через объем осадка пыли, образующийся при фильтровании:

$$h = \frac{V\bar{\delta}_o\tau}{F(1-m)\tau},$$

где x_o – объемная доля пыли в потоке, поступившей в каналы перегородки, $\text{м}^3/\text{м}^3$; τ – продолжительность цикла фильтрования, с.

Используя канальную модель пылевого осадка, выразим число каналов N_n на 1 м^2 несжимаемого осадка как отношение свободного сечения фильтрующей перегородки $S_{св}$ к сечению одного канала пылевого осадка S_k :

$$N_n = \frac{S_{св}}{S_k} = \frac{4Fm}{\pi d^2} = \frac{4\delta}{\pi d^2},$$

где F – поверхность фильтрующей перегородки, равная 1 м^2 .

Тогда уравнение Пуазейля примет следующий вид:

$$\frac{V}{Fm\tau} = \frac{\pi\Delta P_{oc}d^4 4mF(1-m)\tau}{128\mu\xi_n\pi d^2 Vx_o\tau} \Delta P = 1 / (A - C\tau)^2$$

или

$$\frac{V^2}{F^2 m^2 \tau^2} = \frac{\Delta P_{oc} d^2 (1-m)}{32\mu\xi_n \bar{\delta}_o \tau}. \quad (2)$$

Выразим размер каналов пылевого слоя как эквивалентный диаметр

$$d = 4m / f_n,$$

где f_n – удельная поверхность пылевого осадка, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Тогда число каналов на 1 м^2 пылевого осадка

$$N_n = f_n^2 / (4\pi m). \quad (3)$$

Если подставим в уравнение (2) полученное число каналов и учтем, что левая часть этого уравнения представляет истинную скорость потока в каналах фильтрующей перегородки W , получим

$$W^2 = \frac{\Delta P_{oc} d^2 (1-m)}{32\mu\xi_n \bar{\delta}_o \tau}. \quad (4)$$

Обозначим в этом уравнении через r_o комплекс величин правой части уравнения, характеризующих свойства пыли:

$$r_o = \frac{32\xi_n}{d^2(1-m)} = \frac{2\xi_n f_n^2}{m^2(1-m)}.$$

Этот комплекс является удельным сопротивлением пылевого осадка. Заменим в этом комплексе диаметр канала на эквивалентный диаметр каналов пылевого слоя:

$$r_o = \frac{2\xi_n f_n^2}{m^2(1-m)}. \quad (5)$$

Коэффициент кривизны каналов слоя пыли рассчитывается [18] по уравнению

$$\zeta_n = 1 + [(\pi/2) - 1](1-m)^{2/3}.$$

Удельную поверхность слоя пылевого осадка из шарообразных частиц можно рассчитать по уравнению

$$f_n = f_q + n_q,$$

где f_q – поверхность частицы пыли; n_q – количество частиц пыли в слое.

Поверхность шарообразной частицы диаметром d_q равна:

$$f_q = \pi d_q^2.$$

Число таких частиц, составит:

$$n_q = (1-m) / V_q = 6(1-m) / (\pi d_q^3),$$

где V_q – объем пылевой частицы, м^3 .

Окончательно удельная поверхность пылевого осадка определится уравнением

$$f_n = 6(1-m) / d_q.$$

Если в качестве диаметра частиц принять медианный размер пыли (δ_{50}), то

$$f_n = 6(1-m) / \delta_{50}.$$

Используя удельное сопротивление осадка, преобразуем уравнение (4) к следующему виду:

$$\Delta P_{oc} = r_o \mu x_o W^2 \tau.$$

Объемную долю пыли в потоке, поступившей на фильтрацию, можно выразить через массовую концентрацию запыленного потока $Z_{вх}$, а истинную скорость потока – через скорость фильтрования (W_o). Опытные исследования показали, что при фильтровании не вся пыль осаждается в щелевой перегородке. Значительная ее часть выпадает из потока в корпусе аппарата, не доходя до фильтрующего слоя. Измерениями массы пыли, осевшей в щелях и на поверхности щелевой перегородки, установлено, что ее количество в среднем составляло около половины поступающей в аппарат пыли. Для учета этого фактора, а также влияния дисперсности и отличия пылевых частиц от шарообразной формы предложено в уравнение, определяющее прирост гидравлического сопротивления, ввести поправочный коэффициент k_n , тогда

$$\Delta P_{oc} = k_n r_o \mu Z_{вх} W_o^2 \tau / (\rho_n m^2). \quad (6)$$

Для расчета удельного сопротивления в литературе имеется ряд зависимостей, из которых наиболее известными и достаточно надежными являются уравнения Эргана и Козени–Кармана [19].

По уравнению Эргана

$$r_o = 150\varphi(1-m)^2 / (m^3\delta^2), \quad (7)$$

где φ – коэффициент формы частиц; δ – размер частиц пыли, м.

На основе уравнения Козени–Кармана

$$r_o = K_k f_n^2 (1-m)^2 / m^3, \quad (8)$$

где K_k – константа, которую ориентировочно рекомендуется принимать в пределах 4–5.

В табл. 1 представлено сравнение опытных удельных сопротивлений различной пыли, которые рассчитаны по уравнению (5), а также по уравнениям Эргана (7) и Козени–Кармана (8). Опытные значения удельного сопротивления определялись измерением гидравлического сопротивления, сформированного на тканевой подложке слоя пыли и рассчитанного на основе уравнения фильтрации [13]:

$$r_o = \frac{\Delta P m}{\mu W_o h}$$

Таблица 1. Удельное сопротивление пылевых осадков
Table 1. Resistivity of dust precipitation

| Осадок пыли Dust precipitate | $\rho_n, \text{кг/м}^3$ (kg/m ³) | $\delta_{50}, \text{мкм}$ (μm) | $Re_{нк}$ | Удельное сопротивление $r_o \cdot 10^{-11}, \text{м}^{-2}$ Resistivity $r_o \cdot 10^{-11}, \text{m}^{-2}$ | | | |
|-------------------------------------|--|---|-----------|---|--|------|------|
| | | | | опытное experimental | рассчитанное по уравнению designed by the equation | | |
| | | | | | (5) | (7) | (8) |
| Гипохлорит Hypochlorite | 1644 | 32 | 0,10 | 5,03 | 4,69 | 4,83 | 7,89 |
| Дробленный песок Crushed sand | 1550 | 40 | 0,13 | 2,67 | 2,36 | 2,33 | 3,15 |
| | 1550 | 30 | 0,17 | 2,84 | 2,99 | 2,76 | 2,81 |
| Цемент Cement | 2900 | 15 | 0,09 | 13,20 | 10,70 | 9,60 | 8,90 |
| Мука Flour | 933 | 40 | 0,15 | 2,62 | 1,80 | 1,70 | 1,82 |

Данные табл. 1 показывают, что предложенная зависимость (5) для расчета удельного сопротивления осадка хорошо согласуется с уравнениями Козени–Кармана и Эргана и опытными данными. Значения критерия $Re_{нк}$ соответствуют ламинарному режиму фильтрации, и при его расчете для всех пылей фактор формы φ принят равным 0,8.

Для расчета гидравлического сопротивления при фильтрации с закупориванием пор используется зависимость [13]

$$\Delta P = 1 / (A - C\tau)^2, \quad (9)$$

где

$$A = (1 / \Delta P)^{0,5}.$$

Зависимость (9) получена на основе уравнения Гагена–Пуазейля для фильтрации суспензий в условиях ламинарного режима при постоянной скорости фильтрации, после преобразования уравнения

$$C\tau = (1 / \Delta P_q)^{0,5} - (1 / \Delta P)^{0,5}.$$

Коэффициент C в уравнении (9) определяется по зависимости

$$C = \frac{x_o}{\pi \ell} \left(\frac{\pi W_o}{8 \mu \ell N_k} \right)^{0,5}, \quad (10)$$

где ℓ – длина канала щелевой перегородки, м; N_k – число каналов на 1 м² щелевой перегородки, которое по аналогии с зависимостью (3) предлагается рассчитывать по уравнению

$$N_k = f_{щп}^2 / (4\pi \varepsilon_o),$$

где $f_{щп}$ – удельная поверхность проволоки в щелевой перегородке.

$$f_{щп} = 4 / d_{щп},$$

где $d_{щп}$ – диаметр проволоки, м.

Примем для оценки запыленности потока не объемную x_o , а массовую концентрацию $Z_{вх}$ и введем поправочный коэффициент k_n , аналогично уравнению (6), тогда уравнение (10) примет вид:

$$C = \frac{k_n Z_{вх}}{\pi \ell \rho_n} \left(\frac{\pi W_o}{8 \mu \ell N_k} \right)^{0,5}. \quad (11)$$

Длину каналов выразим с учетом их кривизны с помощью зависимости

$$\ell = \xi_k \dot{I}.$$

где H – толщина фильтрующей перегородки; ξ_k – коэффициент извилистости каналов щелевого слоя, который можно рассчитать [18] из уравнения

$$\xi_k = 1 + [(\pi / 2) - 1](1 - \varepsilon_o)^{2/3}.$$

Толщина фильтрующей перегородки зависит от способа намотки слоев проволоки. Для коридорной намотки

$$H = n d_{щп} + h_c (n - 1),$$

где n – число слоев в перегородке; h_c – размер щели между слоями проволоки, м.

Толщина перегородки при шахматной намотке

$$H = n d_{щп} + h_c (n - 1) - 0,1316 d_{щп} (n - 1).$$

Прирост гидравлического сопротивления при фильтрации с закупориванием пор определяется из уравнения (1)

$$\Delta P_{oc} = \Delta P - \Delta P_q, \quad (12)$$

в котором общее сопротивление ΔP рассчитывается с использованием уравнений (9) и (11), а сопротивление чистой щелевой перегородки ΔP_q находится по зависимости, полученной на основе уравнения М.Э. Аэрова [20], в соответствии с рекомендациями [16].

Для проверки более вероятного механизма фильтрации в щелевом фильтре были проведены экспериментальные исследования гидравлического сопротивления на лабораторной установке при улавливании из воздуха муки, измельченного песка, цемента и порошкообразного нейтрального гипохлорита кальция. Визуальная оценка результатов фильтрации показала, что в реальности вид кривой накопления осадка пыли не соответствует ни механизму с образованием осадка, ни с закупориванием пор. Установлено, что до 40–60 % поступающей пыли задержи-

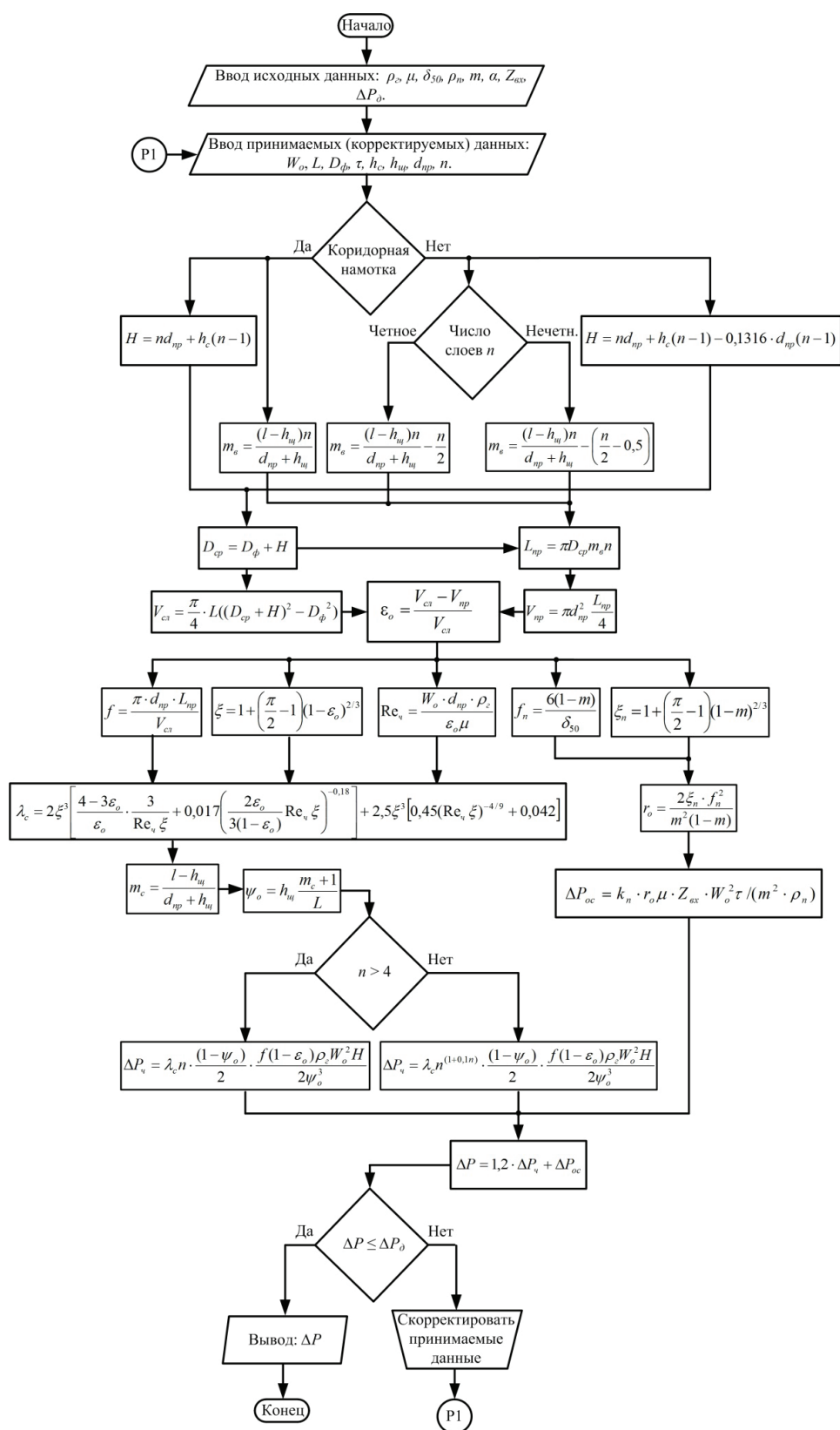


Рисунок. Блок-схема расчета гидравлического сопротивления щелевого фильтра

Figure. Block diagram for calculating the hydraulic resistance of slotted filter

вается не в каналах перегородки и на ее поверхности, а осажается в фильтре, не доходя до перегородки, и не влияет на приrost сопротивления. На основании этого предложено поправочный коэффициент k_{π} в уравнениях (6) и (11) принять равным 0,5.

Таблица 2. Сравнение опытных и рассчитанных значений прироста гидравлического сопротивления

Table 2. Comparison of experimental and calculated values of gain hydraulic resistance

| Пыль Dust | $\delta_{\text{ш}}$, мкм (μm) | W_0 , м/с (mps) | $Re_{\text{шк}}$ | $d_{\text{шр}}$, мм (mm) | ρ , шт (pcs) | $Z_{\text{шр}}$, г/м ² (g/m ²) | Приrost сопротивления $\Delta P_{\text{ос}}$, Па Resistance gain, Pa | | |
|----------------------------|---|-------------------|------------------|---------------------------|-------------------|--|--|---|--------|
| | | | | | | | опытный experimental | рассчитанный по уравнению designed by the equation | |
| | | | | | | (6) | (12) | | |
| Мука Flour | 40 | 0,0378 | 2,8 | 0,75 | 2 | 17,8 | 68,7 | 56,4 | 1153,0 |
| Песок Sand | | 0,0378 | 2,9 | | | 23,3 | 110,0 | 102,3 | 224,8 |
| | | 0,0545 | 4,2 | | | 23,0 | 168,7 | 178,7 | 542,8 |
| | 30 | 0,0512 | 6,2 | 1,2 | 3,6 | 74,2 | 87,8 | 175,1 | |
| Цемент Cement | 15 | 0,0545 | 4,2 | 0,75 | 4 | 26,8 | 220,1 | 246,4 | 132,4 |
| Гипохлорит Hypochlorite | 32 | 0,0378 | 2,9 | | | 23,4 | 200,1 | 229,1 | 223,5 |

Для условий экспериментальных исследований были проведены сравнительные расчеты прироста гидравлического сопротивления по зависимости (6) для фильтрования с образованием осадка и для фильтрования с закупориванием пор по уравнению (12). Опытные результаты исследований и расчетные данные представлены для сравнения в табл. 2. Фактор формы проволоки принимался равным единице.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фильтр для очистки газа от пыли: пат. № 156669 Российская Федерация / Н.М. Самохвалов, В.В. Виноградов, Ю.А. Зыкова; заяв. 30.03.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 31. – 2 с.
2. Gang Xiao, Xihui Wang, Jiapeng Zhang, Mingjiang Ni, Xiang Gao, Zhongyang Luo, Kefa Cen Granular bed filter: A promising technology for hot gas clean-up // Powder Technology. – 2013. – V. 244. – № 8. – P. 93–99.
3. Красовицкий Ю.В., Дуров В.В. Обеспыливание газов зернистыми слоями. – М.: Химия, 1991. – 91 с.
4. Guo-hua Yang, Jiang-hua Zhou. Experimental Study on a New Dual-Layer Granular Bed Filter for Removing Particulates // Journal of China University of Mining & Technology. – 2007. – V. 17. – № 2. – P. 201–204.
5. Henriquez V., Macias-Machin A. Holt gas filtration, using a moving bed heat exchanger-filter (MHEF) // Chemical Engineering and processing. – 1997. – V. 36. – Iss. 5. – P. 353–361.
6. Lawrence K., Norman C., Yung-Tse Hung. Air Pollution Control Engineering. – New York: Humana Press Inc., 2004. – 628 p.
7. Анжеуров Н.М., Вальдберг А.Ю., Красовицкий Ю.В. Анализ современного состояния теории процесса фильтрации аэрозо-

Сравнение показало, что для представленных условий эксперимента лучшая сходимость опытных и расчетных данных наблюдается для механизма фильтрования с образованием осадка. Для фильтрования с закупориванием пор погрешность очень высока. Это указывает на то, что в щелевом фильтре при фильтровании, особенно с высокой скоростью, затруднено закупоривание пор. Отчасти это связано с малой толщиной фильтрующей перегородки, в которой под действием возрастающего давления поток выдувает часть уловленной пыли из щелевых каналов. Кроме этого часть пыли осажается на лобовой поверхности. При расчетах же считается, что вся поступившая в щелевой слой пыль осажается в каналах. В результате расчетное сопротивление по механизму фильтрования с закупориванием пор в основном больше опытного.

На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований предлагается для расчета прироста гидравлического сопротивления при улавливании пыли в щелевом фильтре использовать уравнение (6), которое описывает изменение прироста сопротивления при фильтровании с образованием осадка. Предложенная математическая модель положена в основу методики расчета гидравлического сопротивления щелевого фильтра при очистке запыленных газов. Алгоритм такого расчета на ЭВМ представлен в виде блок-схемы (см. рисунок).

Выводы

Разработанная методика расчета позволяет рассчитать гидравлическое сопротивление щелевого фильтра с учетом характеристик фильтрующей перегородки и физических свойств пыли и газа в зависимости от скорости потока, продолжительности очистки и запыленности газа. Расхождение между опытными и расчетными данными составляет в среднем не более 10 %.

лей (применительно к практике инженерных расчетов) // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды: обзорная информация. – М.: РАН ВИНТИ, 2000. – С. 24–42.

8. Yi-Shun Chen, Yau-Pin Chyou, Shu-Che Li Hot gas clean-up technology of dust particulates with a moving granular bed filter // Applied Thermal Engineering. – 2015. – V. 74. – Iss. 5. – № 1. – P. 146–155.
9. Measurement and correlation of hydraulic resistance of flow through woven metal screens / W.T. Wu, J.F. Liu, W.J. Li, W.H. Hsieh // International Journal of Heat and Mass Transfer. – Elsevier: Philadelphia Vol. 48, Iss. 14, July 2005, P. 3008–3017
10. Биргер М.И. Справочник по пыле- и золоулавливанию. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
11. Trevor S., George C. Filters and Filtration Handbook (Sixth Edition). – Philadelphia: Elsevier Ltd, 2015. – P. 444.
12. Жужиков В.А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий. – М.: Химия, 1971. – 440 с.
13. Самохвалов Н.М., Виноградов В.В. Стационарность процесса и эффективность очистки газов от пыли в щелевом фильтре // Теоретические основы химической технологии. – 2014. – Т. 48. – № 6. – С. 1–5.

14. Lei Guan, Zhongzhu Gu, Zhulin Yuan, Linjun Yang. Numerical study on the penetration of ash particles in a three-dimensional randomly packed granular filter // *Fuel*. – 2016. – V. 163. – Iss. 1. – № 1. – P. 122–128.
15. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973. – 752 с.
16. Виноградов В.В., Зыкова Ю.А., Самохвалов Н.М. Влияние структуры щелевого фильтра на гидравлическое сопротивление // *Механика жидкости и газа*. – 2015. – № 6 – С. 3–10.
17. Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. – Л.: Химия, 1982. – 288 с.
18. Островский Г.М. Пневматический транспорт сыпучих материалов в химической промышленности. – Л.: Химия, 1984. – 104 с.
19. Ужов В.Н., Мягков Б.И., Вальдберг А.Ю. Очистка промышленных газов от пыли. – М.: Химия, 1981. – 392 с.
20. Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. – М.: Химия, 1968. – 510 с.

Поступила 02.03.2016 г.

Информация об авторах

Зыкова Ю.А., старший преподаватель кафедры химической технологии неорганических веществ и материалов Иркутского национального исследовательского университета.

Самохвалов Н.М., кандидат технических наук, профессор кафедры химической технологии неорганических веществ и материалов Иркутского национального исследовательского технического университета.

Виноградов В.В., аспирант кафедры химической технологии неорганических веществ и материалов Иркутского национального исследовательского технического университета.

UDC 532.5.013.12: 532.559.8

DUST LAYER RESISTANCE IN THE SLOTTED FILTER

Yulia A. Zykova¹,
ulya2279@mail.ru

Nikolay M. Samokhvalov¹,
htnv@istu.edu

Vladimir V. Vinogradov¹,
vv158@mail.ru

¹ Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

Relevance of the work. Natural gas produced from wells in the fields, is not a commodity product, as it contains a lot of impurities, including mechanical ones. Therefore, the produced gas is directed to the gas treatment units. One of the stages of the technological cycle is decontamination. Relevance of the research is caused by the need to study the hydraulic resistance of the dust precipitate in the new device for cleaning dusty gases by filtration – slotted filter, which has not been previously studied. The existing methods of calculating the gain of hydraulic resistance are not useful for the dust collecting devices.

The main aim of the research is to carry out the laboratory testing of the slotted filter for identifying the options of precipitate formation and their mathematical description, and development of methodology for calculating a gain of hydraulic resistance when cleaning dusty gases.

Research methods are based on the results of physical modeling of dusty gases filtration to determine the gain of hydraulic resistance and on theoretical analysis of the Darcy equation for mechanisms of precipitation and pore clogging with respect to the slotted filter.

Results. The paper introduces theoretical calculations based on hydraulic resistance when cleaning dusty gases in the slotted filter for filtering mechanisms with precipitation and pore clogging, derived from Poiseuille equation changes. The authors have considered a comparison of the calculated data with the experimental ones using these equations. It is shown that precipitation mechanism convergence of the calculated and the experimental resistance gain is on the average of 10 % and there was significant deviation over 100 % in pore clogging mechanism convergence. The paper introduces the dependence on calculation of dust layer resistivity, which takes into account the curvature of the channels in the dust layer in contrast to the Ergun and Kozeny–Karman equations. The authors proposed the mathematical model, which takes into account the filtering mechanism to form a precipitate, which is the basis for calculating the hydraulic resistance of the slotted filter.

Conclusions. The developed calculation method allows calculating with a reasonable degree of accuracy the hydraulic resistance of the slotted filter considering the characteristics of the filter septum and physical properties of dust and gas, depending on the flow rate, duration of gas and dust cleaning. The technique allows simulating and designing a slotted filter with minimum hydraulic resistance, thereby reducing operating costs.

Key words:

Slotted filter, hydraulic resistance, filtration, pore clogging, precipitation, dust cleaning.

REFERENCES

- Samokhvalov N.M., Vinogradov V.V., Zykova Yu.A. *Filtr dlya ochistki gaza ot pyli* [Filter for gas cleaning from dust]. Patent RF, no. 156669, 2015.
- Gang Xiao, Xihui Wang, Jiapeng Zhang, Mingjiang Ni, Xiang Gao, Zhongyang Luo, Kefa Cen. Granular bed filter: a promising technology for hot gas clean-up. *Powder Technology*, 2013, no. 244, no. 8, pp. 93–99.
- Krasovitskiy Yu.V., Durov V.V. *Obespylivaniye gazov zernistymi sloyami* [Gas dedusting with granular layers]. Moscow, Khimiya Publ., 1991. 91 p.
- Guo-hua Yang, Jiang-hua Zhou. Experimental Study on a New Dual-Layer Granular Bed Filter for Removing Particulates. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2007, vol. 17, no. 2, pp. 201–204.
- Henriquez V., Macias-Machin A. Hot gas filtration, using a moving bed heat exchanger-filter (MHEF). *Chemical Engineering and processing*, 1997, vol. 36, Iss. 5, pp. 353–361.
- Lawrence K., Norman C. Yung-Tse Hung. *Air Pollution Control Engineering*. New York, Humana Press Inc Publ., 2004. 628 p.
- Anzheurov N.M., Valdberg A.Yu., Krasovitskiy Yu.V. Analiz sovremennogo sostoyaniya teorii protsessa filtratsii aerozoley (primenitelno k praktike inzhenernykh raschetov) [Analysis of the current state of the theory of aerosol filtration (with reference to the practice of engineering calculations)]. *Nauchnyye i tekhnicheskiye aspekty okhrany okruzhayushchey sredy: obzornaya informatsiya* [Scientific and engineering aspects of environment protection: review]. Moscow, RAN. VINITI Publ., 2000. pp. 24–42.
- Yi-Shun Chen, Yau-Pin Chyou, Shu-Che Li. Hot gas clean-up technology of dust particulates with a moving granular bed filter. *Applied Thermal Engineering*, 2015, vol. 74, no. 1, pp. 146–155.
- Wu W.T., Liu J.F., Li W.J., Hsieh W.H. Measurement and correlation of hydraulic resistance of flow through woven metal screens. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, vol. 48, Iss. 14, pp. 3008–3017.
- Birger M.I. *Spravochnik po pyle- i zololavlivaniyu* [Handbook of dust and ash collection]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 320 p.
- Trevor S., George C. *Filters and Filtration Handbook (sixth ed.)*. Philadelphia, Elsevier Ltd Publ., 2015. 444 p.
- Zhuzhikov V.A. *Filtrovaniye. Teoriya i praktika razdeleniya suspenziy* [Filtration. Theory and practice of separation of suspensions]. Moscow, Khimiya Publ., 1971. 430 p.
- Samokhvalov N.M., Vinogradov V.V. очистка газов от пыли в щелевом фильтре Stationary and Efficiency of Gas Dusting in

- Slotted Filter. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2014, vol. 48, no. 6, pp. 837–841. In Rus.
14. Lei Guan, Zhongzhu Gu, Zhulin Yuan, Linjun Yang. Numerical study on the penetration of ash particles in a three-dimensional randomly packed granular filter. *Fuel*, 2016, vol. 163, no. 1, pp. 122–128.
 15. Kasatkin A.G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Moscow, Khimiya Publ., 1973. 752 p.
 16. Vinogradov V.V., Zykova Yu.A., Samokhvalov N.M. Effect of the Slot Filter Structure on Hydraulic Resistance. *Fluid Dynamics*, 2015, vol. 50, no. 4, pp. 463–470. In Rus.
 17. Romankov P.G., Kurochkina M.I. *Gidromekhanicheskie protsessy khimicheskoy tekhnologii* [Hydro-mechanical processes of chemical technology]. Leningrad, Khimiya Publ., 1982. 288 p.
 18. Ostrovskiy G.M. *Pnevmaticheskiy transport sypuchikh materialov v khimicheskoy promyshlennosti* [Pneumatic transport of bulk materials in chemical industry]. Leningrad, Khimiya Publ., 1984. 104 p.
 19. Uzhov V.N., Myagkov B.I., Valdberg A.Yu. *Ochistka promyshlennykh gazov ot pyli* [Industrial gases dusting]. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 392 p.
 20. Aerov M.E., Todes O.M. *Gidravlicheskie i teplovye osnovy raboty apparatov so statsionarnym i kipyashchim zernistym slozem* [Hydraulic and thermal basic operation of devices with fixed and fluidized granular layer]. Moscow, Khimiya Publ., 1968. 510 p.

Received: 2 March 2016.

Information about the authors

Yulia A. Zykova, senior teacher, Irkutsk National Research Technical University.

Nikolay M. Samokhvalov, Cand. Sc., professor, Irkutsk National Research Technical University.

Vladimir V. Vinogradov, postgraduate student, Irkutsk National Research Technical University.

УДК 622.245.224

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ ФАЗ В БУРОВЫХ РАСТВОРАХ НА УГЛЕВОДОРОДНОЙ ОСНОВЕ

Тирон Денис Вячеславович¹,
denistiron@mail.ru

Уляшева Надежда Михайловна¹,
zav_bs@ugtu.net

¹ Ухтинский государственный технический университет,
Россия, 169300, г. Ухта, ул. Первомайская, 13.

Исследование проблемы испарения компонентов буровых растворов на углеводородной основе (РУО) является актуальной задачей и имеет практическую значимость для специалистов, осуществляющих инженерное сопровождение буровых растворов.

Основная цель исследования: разработка метода изучения процесса испарения компонентов РУО, исследование кинетики испарения углеводородной и водной фаз и степени изменения технологических характеристик РУО, создание алгоритма процедуры восстановления исходных концентраций эмульсии.

Методы исследования: собственная экспресс-методика исследования процесса испарения компонентов эмульсионных буровых растворов, ретортный анализ, анализ электрической стабильности, методики определения технологических характеристик буровых растворов по стандартам АНИ (Американского Нефтяного Института).

Результаты. Разработана экспресс-методика исследования процесса испарения компонентов эмульсионных буровых растворов. В ходе проведенных исследований по испарению эмульсионного раствора было выявлено, что при температуре 60 °С происходит значительное испарение водной и углеводородной фаз. Установлено, что процесс испарения водной и углеводородной фаз эмульсионных растворов делится на две стадии: 1) активное испарение, значительное снижение массы раствора за счет испарения водной фазы (первые 4 ч), 2) медленное испарение, выравнивание соотношения объема испарившихся фаз (4–12 ч). Установлено, что при испарении воды и минерального масла происходит интенсивный рост реологических параметров эмульсии из-за увеличения концентрации твердой фазы и плотности. Дополнительно выведены зависимости удельного объема испарения от времени, позволяющие рассчитать количество воды и углеводорода, необходимое для восстановления начальных концентраций. Разработан алгоритм процедуры восстановления исходных концентраций компонентов эмульсионных буровых растворов, применение которого может значительно упростить процесс контроля качества промывочной жидкости, повысить эффективность применения большинства современных РУО при бурении скважин с высокими забойными температурами.

Ключевые слова:

Буровой раствор на углеводородной основе, минеральное масло, испарение фаз, кинетика испарения, реологические параметры, удельный объем испарения, аппроксимация.

Введение

На сегодняшний день, явление испарения компонентов эмульсионных буровых растворов практически не изучено. Не существует общепринятой методики исследования данного процесса. В разное время предпринималось несколько попыток оценить степень испарения промывочных жидкостей, используемых при строительстве скважин. Но, к сожалению, ни один метод не позволяет сделать однозначный вывод по количеству испарения в тех или иных условиях бурения, так как объем потерь зависит от многих факторов, в том числе [1–5]:

- от типа углеводородной основы;
- степени открытости емкостей хранения и площади поверхности испарения;
- температурного режима и скважинных условий;
- наличия перемешивания, вентиляции, искусственного подогрева.

Анализ промысловых материалов

Исследования зарубежных специалистов [6–7] из компании Halliburton по испарению РУО показывают, что в процессе испарения из раствора удаляется жидкая фаза, состоящая из водной и

углеводородной фаз. Доля углеводородной фазы составляет 10 % от общего объема испарившейся жидкости. Зависимость объема испарившейся жидкости от температуры определяется по следующей формуле [8–9]:

$$\text{Evaporation, bbl/hr} = (Rw/0,18) \times$$

$$\times 006 \exp(0,0344 \cdot \text{Flow line Temperature}), \quad (1)$$

где *evaporation* – испарение, бар/час; *flow line temperature* – температура циркуляции на поверхности, °F; *Rw* – содержание водной фазы по реторте, %.

Хотелось бы отметить, что данные исследования носят субъективный характер, поскольку проводились для конкретных месторождений – «Кузина» и «Купиагва» (Колумбия) – с раствором, где дисперсионной средой являлось дизельное топливо (плотность 1240 кг/м³, соотношение фаз 80/20).

Тем не менее воспользуемся данной формулой и рассчитаем возможный объем испарения для условий Самбургского и Восточно-Уренгойского месторождений Западной Сибири.

1. Для раствора на основе минерального масла (соотношение фаз – 70/30, содержание водной фазы по реторте – 24 %, плотность раствора – 1320 кг/м³, минерализация – 40000 мг/л) в диапазоне температур от 40 до 50 °С (фактические

температуры выходящего бурового раствора при бурении на устье скважины) испарение жидкости составляет от 1,1 до 2 м³/сутки. При этом масло испаряется от 0,1 до 0,2 м³/сутки. На рис. 1 представлен график экспоненциальной зависимости объема испарившейся жидкости от температуры в метрической системе.

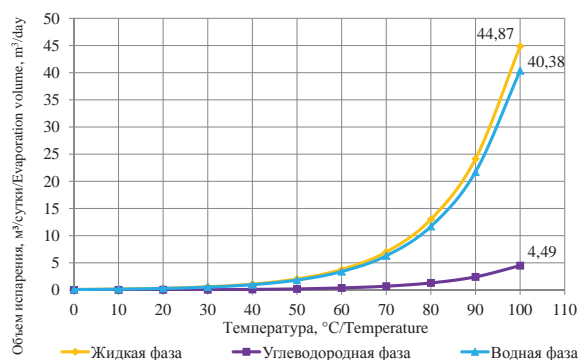


Рис. 1. Зависимость объема испарившейся жидкости от температуры в эмульсионном растворе на основе минерального масла

Fig. 1. Dependence of the evaporated water volume on the temperature in mineral oil-based emulsion mud

2. В случае с применением дизельного топлива процент содержания неводной фазы в испаряющейся жидкости выше и может изменяться от 10 до 80 % (рис. 2), в зависимости:

- от типа дизельного топлива (зимнее или летнее) и содержания в нем легких ароматических углеводородов;
- соотношения дизельной и водной фазы;
- степени минерализации воды и вида соли (CaCl₂, NaCl, KCl);
- объема добавляемого дизельного топлива в раствор при поглощениях, осложнениях, требующих повышения содержания углеводородной жидкости (высокое давление и эквивалентная циркуляционная плотность).

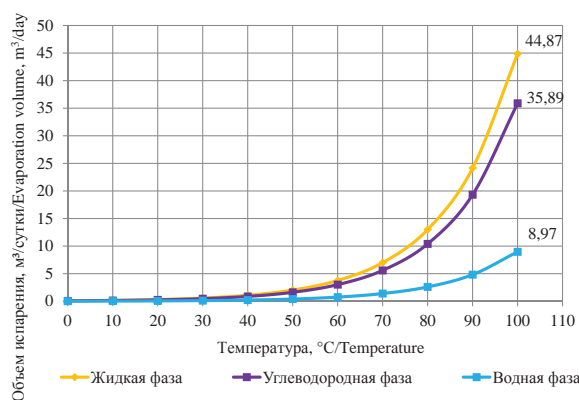


Рис. 2. Зависимость объема испарившейся жидкости от температуры в эмульсионном растворе на основе дизельного топлива

Fig. 2. Dependence of the evaporated water volume on the temperature in diesel-based emulsion mud

Таким образом, при использовании дизельного топлива при строительстве скважин на Самбургском и Восточно-Уренгойском месторождениях, согласно расчетам, для температур циркуляции от 40 до 50 °С, при условии, что общий объем испаряющейся жидкости не меняется, дизельного топлива может испариться от 0,1 до 1,6 м³/сутки.

Приведенные выше расчеты не совсем совпадают с фактическими промысловыми замерами объемов испарения в процессе бурения. На скважине № 1206 Самбургского месторождения была отобрана проба эмульсионного раствора ENVROMUL на основе дизельного топлива объемом 10 л (соотношение фаз – 72/28, содержание водной фазы по реторте – 22 %, плотность раствора – 1280 кг/м³, минерализация – 42000 мг/л) и оставлена в емкостном блоке на сутки. По истечении 24 часов объем пробы уменьшился на 0,2 л (2 %). Таким образом, при наличии в циркуляции порядка 160 м³ бурового раствора за сутки на испарение уходит около 3,2 м³ раствора, из них 2,56 м³ – дизельное топливо. Естественно, что в данном примере определение объема очень грубое. Аналогичные замеры были произведены на других месторождениях, полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Данные потерь бурового раствора на основе дизельного топлива в результате испарения при бурении скважин на Яро-Яхинском и Самбургском месторождениях

Table 1. Mud losses (diesel) due to evaporation, when drilling on Yaro-Yakhinsk and Samburg fields

| Месторождение Field | Интервал бурения, м Drilling interval, m | Время бурения на РУО, сутки Time of drilling with oil-based mud, days | Объем испарения, м ³ Volume of evaporation, m ³ | Интенсивность испарения, м ³ /сутки Evaporation rate, m ³ /days |
|--|---|--|--|--|
| Яро-Яхинское, куст 3 скважина 305 Yaro-Yakhinsk, pad 3 well 305 | 1652–4398 | 35 | 78,7 | 2,25 |
| Самбургское, куст 12 скважина 1205 Samburg, pad 12 well 1205 | 1665–4580 | 57 | 139 | 2,44 |
| Самбургское, куст 12 скважина 1206 Samburg, pad 12 well 1206 | 1648–3621 | 20 | 54,2 | 2,44 |

Как показывают статистические данные, интенсивность испарения по пробуренным скважинам изменяется от 2,25 до 2,44 м³/сутки. Данное обстоятельство влечет за собой повышенный расход химических реагентов и дорогостоящей углеводородной основы раствора.

Помимо физических потерь объема эмульсии в результате испарения, данный процесс, по нашему мнению, влияет на изменение вязкостных характеристик. Подробное описание механизма влияния приведено ниже.

На Восточно-Сарутаюском и Россихинском месторождениях Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции, при бурении интервала под эксплуатационную колонну, с глубины 4500 м по вертикали (Старооскольский горизонт), наблюдается резкое увеличение вязкостных характеристик, повышение соотношения фаз и плотности раствора на основе минерального масла. Горные породы, слагающие данный горизонт, – твердые, кварцевые песчаники, черные, темно-серые алевролиты, плотные, крепкие аргиллиты. При сравнительно небольших скоростях проходки (1,5–3 м/час) и инертных, по отношению к эмульсионному раствору, породах, происходит сильное загущение промывочной жидкости, обусловленное ростом реологических характеристик. Считается, что повышение вязкостных параметров РУО при углублении скважины связано с наработкой твердой фазы, попаданием пластовой воды и влажной выбуренной породы, изменением соотношения фаз и концентрации структурообразователя. Однако нами было выдвинуто предположение о том, что значительное влияние на загущение эмульсионного раствора оказывает испарение его компонентов (водная и углеводородная фаза) с поверхности в емкостном парке буровой установки.

Результаты исследования кинетики испарения экспресс-методом

В подтверждение выдвинутой выше гипотезы на кафедре бурения УГТУ были проведены лабораторные исследования по испарению эмульсионного раствора. В качестве дисперсионной среды было решено использовалось минеральное масло, поскольку применение дизельного топлива в качестве основы ограничено по экологическим и пожарным требованиям.

Минеральное масло – как базовая жидкость для эмульсионных растворов – является продуктом нефтяного происхождения, производится путем перегонки мазута и отличается высокой степенью испаряемости. По современным представлениям [10–12] минеральное масло является сложной коллоидной системой, состоящей из различных по качеству и составу высокомолекулярных соединений (асфальтены, смолы, полициклические ароматические углеводороды и парафины) и низкомолекулярных углеводородов. Лучшими вязкостно-температурными свойствами обладают минеральные масла с содержанием асфальтенов не более 2 %, ароматических углеводородов и смол не менее 60 %. При повышенном содержании парафино-нафтеновых углеводородов с увеличением температуры наблюдается резкое падение вязкости, что связывается с плавлением парафинов и со-

ответствующим уменьшением прочности образуемой ими пространственной структуры.

Что касается испаряемости, то ее интенсивность напрямую зависит от содержания легких углеводородных фракций, молекулы которых при высоких температурах улетучиваются из общего объема.

Для проведения исследований был выбран эмульсионный раствор ENVIROMUL компании Halliburton плотностью 1410 кг/м³, использующийся при бурении интервала под эксплуатационную колонну на вышеупомянутых месторождениях. Состав исследуемого раствора представлен в табл. 2.

Таблица 2. Компонентный состав исследуемого эмульсионного раствора

Table 2. Component composition of the test emulsion mud

| Реагент/Reagent | Концентрация, кг (литр)/м ³ Concentration, kg (liter)/m ³ | Функция/Function |
|---|--|---|
| Минеральное масло Mineral oil | 600 | Дисперсионная среда Dispersion liquid |
| Полиаминированная жирная кислота Fatty acid | 20 | Эмульгатор Emulsifier |
| Известь Lime | 20 | Регулятор щелочности Alkalinity control |
| Рассол хлористого кальция CaCl ₂ brine | 200 | Дисперсная фаза Dispersed phase |
| Асфальтит Asphalt | 20 | Понизитель фильтрации Filtration control |
| Органофильный бентонит Organophilic bentonite | 10 | Структурообразователь Structurant |
| Дисперсия жидкого лецитина Dispersion of liquid lecithin | 2 | Гидрофобизатор твердой фазы Hydrophobing agent |
| Карбонат кальция 60 мкм CaCO ₃ 60 mkm | 800 | Утяжелитель Weighting agent |

Лабораторные исследования осуществлялись по следующей методике. При приготовлении РУО каждый образец подвергался перемешиванию миксером в течение 6 часов (для стабилизации параметров). Затем с помощью шестискоростного вискозиметра FANN и термобулавки (для нагрева раствора до требуемой температуры) осуществлялось испарение раствора при атмосферном давлении и температуре 60 °С с постоянным перемешиванием по четыре часа в день. В начале каждого рабочего дня перед нагреванием раствор взвешивался на весах с точностью до одного грамма. Замер основных параметров производился через каждые четыре часа эксперимента.

Плотность раствора определялась тарированными рычажными весами, реологические харак-

теристики (пластическая вязкость, динамическое и статическое напряжение сдвига) измерялись вышеупомянутым вискозиметром FANN. Электростабильность – с помощью тестера стабильности эмульсии, а содержание твердой и жидкой фазы – ретортным анализом.

Температура проведения эксперимента составляла 60 °С, что соответствует рабочей температуре бурового раствора в приемных емкостях во время бурения скважины.

В качестве дисперсионной среды использовались два вида минерального масла: промышленное «И-5А» и внесезонное загущенное гидравлическое масло «ВМГЗ». Данные жидкости применяются двумя крупнейшими сервисными компаниями для приготовления РУО.

Приготовление первой рецептуры осуществлялось на основе промышленного масла «И-5А», результаты тестирования представлены в табл. 3.

Таблица 3. Технологические параметры эмульсии на основе минерального масла «И-5А» до и после испарения

Table 3. Technological parameters of emulsion mud («E-5A» mineral oil) before and after evaporation

| Параметры бурового раствора Mud properties | Базовый состав Base composition | 4 ч испарения 4 hr evaporation | 8 ч испарения 8 hr evaporation | 12 ч испарения 12 hr evaporation |
|--|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³ | 1410 | 1465 | 1470 | 1470 |
| 600/300 | 154/88 | 131/72 | 172/91 | 168/88 |
| 200/100 | 65/40 | 51/29 | 64/34 | 61/32 |
| 6/3 | 10/8 | 6/5 | 3/2 | 3/2 |
| СНС 10 сек./10 мин, фунт/100футов ² Gels 10 sec/10 min, lbs/100ft ² | 8/15 | 6/10 | 3/22 | 3/16 |
| ПВ, сПз/Plastic viscosity, cP | 66 | 59 | 81 | 80 |
| ДНС, фунт/100футов ² Yield point, lbs/100ft ² | 22 | 13 | 10 | 8 |
| Электростабильность, Вт Electrical stability, volts | 915 | > 2000 | > 2000 | > 2000 |
| Масло, %/Oil, % | 58 | 64 | 64 | 65 |
| Вода, %/Water, % | 16 | 6 | 2 | 1 |
| Твердая фаза, %/Solids, % | 26 | 30 | 34 | 34 |
| Соотношение масло/вода, % Mineral oil/water ratio, % | 78,4/21,6 | 91,4/8,6 | 97/3 | 98,5/1,5 |
| Изменение массы раствора, г Change in mud weight, g | 0 | 24 | 6 | 4 |
| Суммарное изменение массы раствора, г Total change in mud weight, g | 0 | 24 | 30 | 34 |

На рис. 3 представлена зависимость изменения массы раствора от времени испарения, в дальнейшем данное отношение будем называть «кинетикой испарения». Видно, что за первые четыре часа испарения при динамическом перемешивании наблюдается интенсивное снижение массы раствора (24 г), в последующем процесс испарения замедляется (4–6 г).

На рис. 4 показано изменение основных параметров РУО. Из графических зависимостей следует, что испарение жидкости приводит к увеличению концентрации твердой фазы, что в свою очередь вызывает рост плотности. Рост электростабильности означает, что из раствора активно испаряется вода, уже после четырех часов испарения прибор показывает максимальные значения (более 2000 В).



Рис. 3. Кинетика испарения эмульсионного раствора на основе масла «И-5А»

Fig. 3. Kinetics of evaporation in mineral oil-based emulsion mud «E-5A»

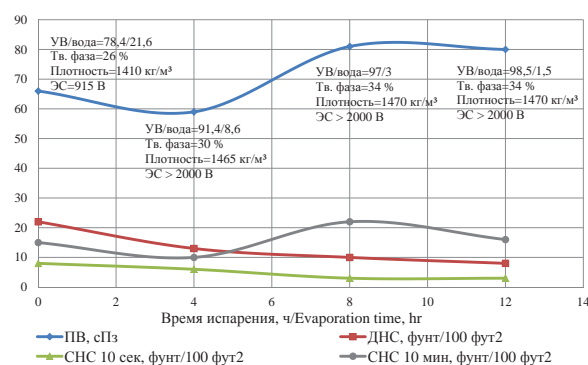


Рис. 4. Изменение свойств эмульсионного раствора на основе масла «И-5А» от времени испарения

Fig. 4. Change of properties of the mineral oil-based emulsion mud «I-5A» by evaporation time

Особое внимание следует обратить на изменение реологических характеристик. После четырех часов нагревания наблюдается их снижение, это объясняется активным испарением водной фазы, которая оказывает загущающий эффект. В дальнейшем наблюдается рост пластической вязкости и статического напряжения сдвига за 10 мин (увеличивается концентрация твердой фазы) [13–14].

Динамическое напряжение сдвига уменьшается вследствие увеличения доли углеводородной фазы и ухудшения работы органобентонита при длительном воздействии высокой температуры. Таким образом, за 12 часов нагревания доля твердой фазы увеличилась с 26 до 34 %, а соотношение фаз возросло с 78,4/21,6 до 98,5/1,5. Наблюдается практически полное испарение дисперсной фазы. Визуально раствор представляет собой очень вязкую и густую смесь, не пригодную для использования в промышленных условиях.

В качестве базовой жидкости во второй рецептуре использовалось масло «ВМГЗ» (табл. 4, рис. 5, 6).

Таблица 4. Технологические параметры эмульсии на основе минерального масла «ВМГЗ» до и после испарения

Table 4. Technological parameters of emulsion mud («VMGZ» mineral oil) before and after evaporation

| Параметры бурового раствора Mud properties | Базовый состав Base composition | 4 ч испарения 4 hr evaporation | 8 ч испарения 8 hr evaporation | 12 ч испарения 12 hr evaporation |
|--|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³ | 1410 | 1460 | 1480 | 1480 |
| 600/300 | 145/84 | 130/70 | 211/111 | 175/90 |
| 200/100 | 62/38 | 49/27 | 75/40 | 62/32 |
| 6/3 | 9/8 | 4/3 | 3/2 | 3/2 |
| СНС 10 сек/10 мин, фунт/100 футов ² Gels 10 sec/10 min, lbs/100ft ² | 8/13 | 5/8 | 3/16 | 3/8 |
| ПВ, сПз Plastic viscosity, cP | 61 | 60 | 100 | 85 |
| ДНС, фунт/100 футов ² Yield point, lbs/100ft ² | 23 | 10 | 11 | 5 |
| Электростабильность, Вт Electrical stability, volts | 1038 | > 2000 | > 2000 | > 2000 |
| Масло, %/Oil, % | 60 | 64 | 66 | 65 |
| Вода, %/Water, % | 12 | 4 | 2 | 1 |
| Твердая фаза, % Solids, % | 28 | 32 | 32 | 34 |
| Соотношение масло/вода, % Mineral oil/water ratio, % | 83,3/16,7 | 94,1/5,9 | 97/3 | 98,5/1,5 |
| Изменение массы раствора, г Change in mud weight, g | 0 | 18 | 8 | 2 |
| Суммарное изменение массы раствора, г Total change in mud weight, g | 0 | 18 | 26 | 28 |

Необходимо отметить, что общее снижение массы бурового раствора на основе минерального масла «ВМГЗ» составляет 12 % (28 г), в то время как у раствора на основе масла «И-5А» – 14,8 % (34 г). В целом поведение реологических характеристик во время испарения идентично первой рецептуре. Разница в значениях пластической вяз-

кости объясняется различным «стартовым» соотношением фаз углеводороды/вода (в первом случае 78/22, во втором 83/17), а также различными физико-химическими свойствами применяемых масел.



Рис. 5. Кинетика испарения эмульсионного раствора на основе масла «ВМГЗ»

Fig. 5. Kinetics of evaporation in mineral oil-based emulsion mud «VMGZ»

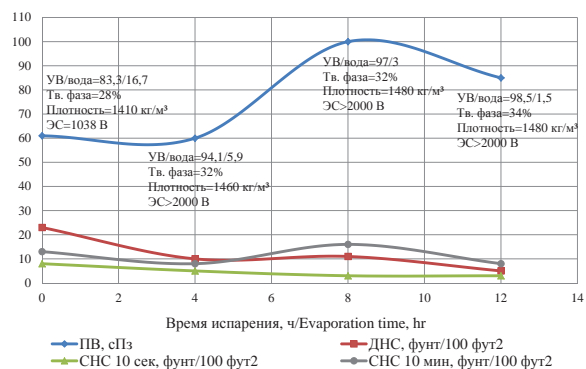


Рис. 6. Изменение свойств эмульсионного раствора на основе масла «ВМГЗ» от времени испарения

Fig. 6. Change of properties of the mineral oil-based emulsion mud «VMGZ» by evaporation time

Сравнивая данные на рис. 3 и 5, видно, что процесс испарения по временному фактору можно разделить на две основные стадии: первая – интенсивное испарение, значительное снижение массы (первые 4 часа), вторая – медленное испарение (от 4 до 12 ч). Ретортный анализ показал, что интенсивное испарение на первой стадии в основном происходит за счет испарения воды. Силы притяжения между молекулами минерализованной воды гораздо меньше, чем между молекулами масла, стабилизированного различными асфальто-смолистыми добавками, поверхностно-активными веществами и структурообразователями. Соответственно, молекулы воды под действием температуры и динамического перемешивания быстрее испаряются, чем молекулы масла.

Что касается второй стадии, то здесь интенсивность испарения резко замедляется по причине уменьшения количества свободной воды и роста содержания углеводородной фазы [15].

Произведем все необходимые расчеты для количественного определения объемов испарившихся фаз.

Обработка результатов лабораторных исследований

Зная массу раствора до и после испарения, данные ретортного анализа и изменение плотности раствора, можно рассчитать объем испарения минерального масла и воды для каждой рецептуры. Воспользуемся следующими формулами:

$$\Delta V_{\text{масла}} = (V_{\text{масла } 1} - V_{\text{масла } 2}) = \\ = (M_1 R_{\text{масла } 1}) / (100 \rho_1) - (M_2 R_{\text{масла } 2}) / (100 \rho_2);$$

$$\Delta V_{\text{воды}} = (V_{\text{воды } 1} - V_{\text{воды } 2}) = \\ = (M_1 R_{\text{воды } 1}) / (100 \rho_1) - (M_2 R_{\text{воды } 2}) / (100 \rho_2),$$

где $V_{\text{масла } 1}$, $V_{\text{масла } 2}$, $V_{\text{воды } 1}$, $V_{\text{воды } 2}$ – объем масла, воды до и после испарения, м³; M_1 и M_2 – масса раствора до и после испарения, кг; $R_{\text{масла } 1}$, $R_{\text{масла } 2}$, $R_{\text{воды } 1}$, $R_{\text{воды } 2}$ – содержание масла, воды по реторте до и после испарения, %; ρ_1 и ρ_2 – плотность раствора до и после испарения, кг/м³.

1. Для рецептуры № 1 на основе масла «И-5А»:

$$\Delta V_{\text{масла } 1} = (0,23 \cdot 58) / (100 \cdot 1410) - (0,206 \cdot 64) / (100 \cdot 1465) = \\ = 0,00000462 \text{ м}^3 = 4,62 \text{ мл};$$

$$\Delta V_{\text{масла } 2} = (0,206 \cdot 64) / (100 \cdot 1465) - (0,2 \cdot 64) / (100 \cdot 1470) = \\ = 0,00000292 \text{ м}^3 = 2,92 \text{ мл};$$

$$\Delta V_{\text{масла } 3} = (0,2 \cdot 64) / (100 \cdot 1470) - (0,196 \cdot 65) / (100 \cdot 1470) = \\ = 0,00000041 \text{ м}^3 = 0,41 \text{ мл};$$

$$\Delta V_{\text{воды } 1} = (0,23 \cdot 16) / (100 \cdot 1410) - (0,206 \cdot 6) / (100 \cdot 1465) = \\ = 0,00001766 \text{ м}^3 = 17,66 \text{ мл};$$

$$\Delta V_{\text{воды } 2} = (0,206 \cdot 6) / (100 \cdot 1465) - (0,2 \cdot 2) / (100 \cdot 1470) = \\ = 0,00000572 \text{ м}^3 = 5,72 \text{ мл};$$

$$\Delta V_{\text{воды } 3} = (0,2 \cdot 2) / (100 \cdot 1470) - (0,196 \cdot 1) / (100 \cdot 1470) = \\ = 0,00000139 \text{ м}^3 = 1,39 \text{ мл}.$$

2. Для рецептуры № 2 на основе масла «ВМГЗ»:

$$\Delta V_{\text{масла } 1} = (0,234 \cdot 60) / (100 \cdot 1410) - (0,216 \cdot 64) / (100 \cdot 1460) = \\ = 0,00000489 \text{ м}^3 = 4,9 \text{ мл};$$

$$\Delta V_{\text{масла } 2} = (0,216 \cdot 64) / (100 \cdot 1460) - (0,208 \cdot 66) / (100 \cdot 1480) = \\ = 0,00000193 \text{ м}^3 = 1,93 \text{ мл};$$

$$\Delta V_{\text{масла } 3} = (0,208 \cdot 66) / (100 \cdot 1480) - (0,206 \cdot 65) / (100 \cdot 1480) = \\ = 0,00000228 \text{ м}^3 = 2,28 \text{ мл};$$

$$\Delta V_{\text{воды } 1} = (0,234 \cdot 12) / (100 \cdot 1410) - (0,216 \cdot 4) / (100 \cdot 1460) = \\ = 0,0000139 \text{ м}^3 = 13,9 \text{ мл};$$

$$\Delta V_{\text{воды } 2} = (0,216 \cdot 4) / (100 \cdot 1460) - (0,208 \cdot 2) / (100 \cdot 1480) = \\ = 0,00000311 \text{ м}^3 = 3,11 \text{ мл};$$

$$\Delta V_{\text{воды } 3} = (0,208 \cdot 2) / (100 \cdot 1480) - (0,206 \cdot 1) / (100 \cdot 1480) = \\ = 0,00000142 \text{ м}^3 = 1,42 \text{ мл}.$$

Значения, полученные расчетным путем, сведены в табл. 5.

По итогам расчета были построены графики кинетики испарения минерального масла и воды (рис. 7, 8).

Таблица 5. Объем испарения минерального масла и воды для каждой исследуемой рецептуры

Table 5. Evaporation volume of mineral oil and water for each formulation

| Испарившаяся жидкость Evaporated fluid | Объем испарения, мл Evaporation volume, ml | | | | Всего, мл Total, ml |
|---|---|-------------|-------------|---------------|------------------------|
| | 0 | 4 ч 4 hr | 8 ч 8 hr | 12 ч 12 hr | |
| Рецептура № 1 на основе масла «И-5А» Formulation № 1 with «E-5A» oil | | | | | |
| Минеральное масло Mine- ral oil | 0 | 4,62 | 2,92 | 0,41 | 7,95 |
| Вода/Water | 0 | 17,66 | 5,72 | 1,39 | 24,77 |
| Рецептура № 2 на основе масла «ВМГЗ» Formulation № 2 with «VMGZ» oil | | | | | |
| Минеральное масло Mine- ral oil | 0 | 4,9 | 1,93 | 2,28 | 9,11 |
| Вода/Water | 0 | 13,9 | 3,11 | 1,42 | 18,43 |

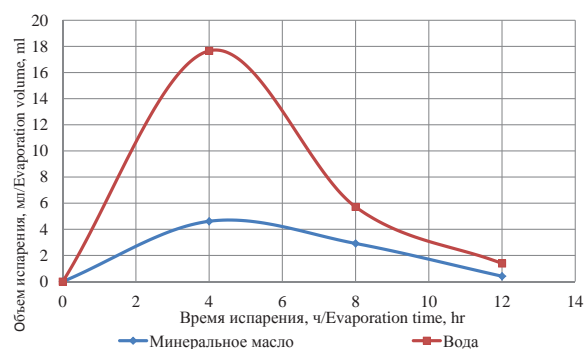


Рис. 7. Кинетика испарения минерального масла «И-5А» и воды при 60 °C

Fig. 7. Kinetics of evaporation of mineral oil «E-5A» and water at 60 °C

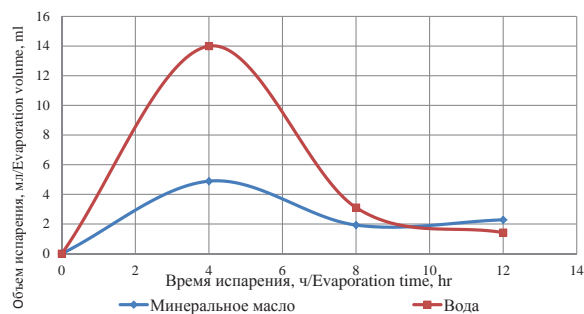


Рис. 8. Кинетика испарения минерального масла «ВМГЗ» и воды при 60 °C

Fig. 8. Kinetics of evaporation of mineral oil «VMGZ» and water at 60 °C

Анализ полученных зависимостей подтвердил, что активное испарение воды происходит первые 4 часа, а через 12 часов испарение воды практически прекращается. При этом с течением времени скорость испарения минерального масла также снижается. Исключение составляет вторая рецептура, где после 12 часов масла испаряется больше, чем воды. Причина заключается в том, что из-за большего «стартового» соотношения – 83/17 про-

тив 78/22 – соответственно меньшего содержания воды, быстрее достигается точка начала активного испарения углеводородной жидкости. В первую очередь испаряются легкие фракции (летучие соединения), затем происходит медленное испарение более тяжелых фракций [16–17].

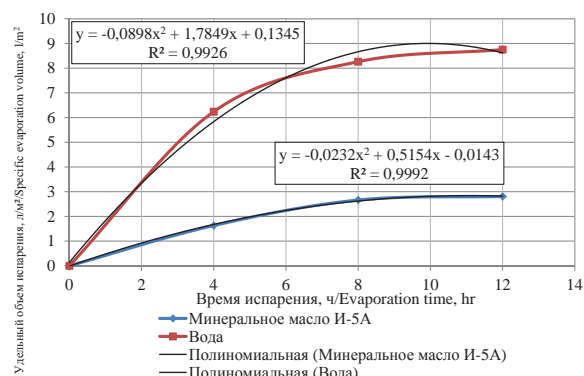


Рис. 9. Зависимость удельного объема испарения воды и минерального масла «И-5А» от времени

Fig. 9. Time dependence of specific volume of water evaporation and mineral oil «E-5A»

Как уже было сказано, помимо температуры скорость испарения зависит от площади открытой поверхности. В нашем случае испарение эмульсии осуществлялось в термкружке, площадь открытой поверхности которой составляет $283 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$. Введем дополнительный параметр – удельный объем испарения ($\text{л}/\text{м}^2$), характеризующий отношение объема испарившейся жидкости к единице площади испарения при температуре эксперимента 60°C :

$$V_{\text{уд}} = V_{\text{исп}} / S_{\text{пов}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{уд}}$ – удельный объем испарения, $\text{л}/\text{м}^2$; $V_{\text{исп}}$ – объем испарившейся жидкости, л; $S_{\text{пов}}$ – площадь поверхности испарения, м^2 .

Пример расчета для рецептуры № 1 на основе масла «И-5А» представлен ниже:

$$V_{\text{уд.масл1}} = 0,00462 / 0,00283 = 1,63 \text{ л}/\text{м}^2.$$

Проведя аналогичные расчеты, были построены соответствующие графические зависимости удельного объема испарения от времени (рис. 9, 10). Интерполировав график полиномиальной функцией 2-й степени, получены математические уравнения с наибольшей величиной достоверности аппроксимации. Расчет удельного объема испарения минерального масла ($\text{л}/\text{м}^2$) и воды ($\text{л}/\text{м}^2$) определяется по следующим уравнениям:

1) для рецептуры с минеральным маслом «И-5А»:

$$I_{\text{м}} = -0,0232t^2 + 0,5154t - 0,0143; \quad (3)$$

$$I_{\text{в}} = -0,0898t^2 + 1,7849t + 0,1345; \quad (4)$$

2) для рецептуры с минеральным маслом «ВМГЗ»:

$$I_{\text{м}} = -0,0145t^2 + 0,4321t + 0,0587; \quad (5)$$

$$I_{\text{в}} = -0,0688t^2 + 1,342t + 0,1613, \quad (6)$$

где t – время, ч. Приведенные выше уравнения позволяют расчетным методом определить количество испарившегося минерального масла и воды с единицы площади испарения как в лабораторных (60°C), так и в полевых условиях.

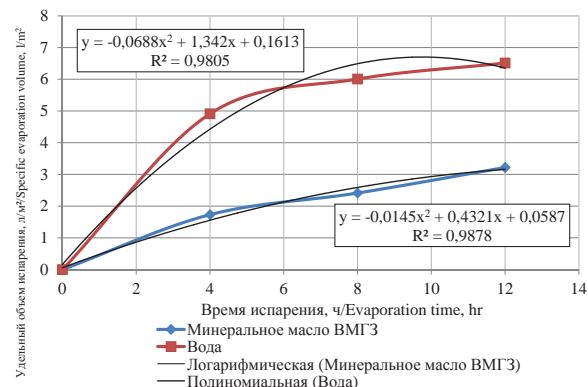


Рис. 10. Зависимость удельного объема испарения воды и минерального масла «ВМГЗ» от времени

Fig. 10. Time dependence of specific volume of water evaporation and mineral oil «VMGZ»

Анализируя результаты лабораторных исследований по испарению компонентов эмульсионного раствора, можно выделить главное.

1. В ходе проведенных лабораторных исследований по испарению эмульсионных растворов было выявлено, что при температуре 60°C происходит значительное испарение водной и углеводородной фаз. Сам процесс испарения делится на две стадии: 1-я – активное испарение, значительное снижение массы (первые 4 часа), 2-я – медленное испарение.
2. В условиях эксперимента за 12 часов наблюдается практически полное испарение водной фазы (в первой рецептуре с 16 до 1 %, во второй – с 12 до 1 %), сопровождающееся схожим изменением реологических параметров.
3. Из-за увеличения концентрации твердой фазы происходит резкий рост плотности бурового раствора (с 1410 до $1480 \text{ кг}/\text{м}^3$). Важно понимать, что оптимизация работы оборудования по очистке промывочной жидкости не позволит сдерживать наработку твердой фазой.
4. При выборе дисперсионной среды для приготовления эмульсионных систем, в частности минерального масла, особое внимание следует уделить на его физико-химические свойства, а именно на групповой углеводородный состав, начальную кинематическую вязкость, степень испаряемости и особенно температуру вспышки. Последняя характеристика является показателем содержания легкокипящих фракций, определяет степень испаряемости масла в процессе эксплуатации. Чем ниже температура вспышки, тем больше степень испаряемости масла, соответственно выше его расход.

Алгоритм процедуры восстановления исходных концентраций компонентов эмульсионных буровых растворов

Для удобства и оперативности управления свойствами и составом инвертно-эмульсионного раствора при бурении в полевых условиях рекомендуется использовать полученные нами математические уравнения (3)–(6).

С помощью данных уравнений можно определить количество минерального масла и воды, необходимое для восстановления исходных концентраций в эмульсионном растворе. Однако резкое добавление всего объема испарившихся жидкостей (особенно воды) сразу приводит к нежелательному резкому загущению системы [18–20]. В промысловых условиях данное обстоятельство может привести к серьезным последствиям [21]:

- скачки и рост рабочего давления на насосах;
- невозможность прокачки эмульсии через наземную обвязку, забивание всасывающих и нагнетательных линий;
- значительные колебания давления могут привести к неисправности и выходу из строя элементов КНБК (ВЗД, роторно-управляемая система, телесистема).

Известен случай, произошедший в 2012 г. на скважине № 234 куста № 5 Кыртаельского месторождения. Там в процессе бурения интервала под хвостовик (диаметр долота 152,4 мм) из резервной емкости в активный циркуляционный объем попало 15 м³ чистого минерального масла, причина – негерметичность шибберных задвижек, использование немаслостойкой резины. После замера основных технологических параметров выяснилось, что соотношение фаз возросло с 77/23 до 84/16, падение плотности – с 1120 до 1050 кг/м³, уменьшение динамического напряжения сдвига – с 21 до 15 фунтов/100 футов². Инженером по растворам было принято решение об оперативном вводе рассчитанного объема минерализованной воды для восстановления исходных свойств эмульсии. В результате быстрого пополнения (1 цикл циркуляции=45 минут) произошло резкое загущение бурового раствора, повышение рабочего давления с 210 до 250 атм, перелив эмульсии через желобную систему, потеря сигнала телесистемы. В итоге для выравнивания параметров раствора в течение 4 часов осуществлялась циркуляция с малой производительностью насосов. В данном случае мы видим наглядный пример того, как неправильная технология обработки РУО привела к непроизводительному времени и увеличению срока строительства скважины.

Учитывая все вышесказанное, предлагается следующий алгоритм процедуры восстановления исходных концентраций компонентов эмульсионного раствора на основе минерального масла:

1. Зная концентрации химических реагентов в эмульсионном растворе, после нескольких циклов циркуляции произвести замер основных параметров.

2. В случае выявления отклонений сделать еще один контрольный замер при прочих равных условиях, особое внимание при этом уделить плотности, соотношению фаз.
3. Рассчитать объем минерального масла и воды, необходимый для восстановления исходных концентраций и свойств.
4. Ввести за один цикл циркуляции весь объем минерального масла.
5. Затем порционно, за 3–4 цикла, ввести рассчитанный объем воды.
6. После ввода всех компонентов, спустя 2–3 цикла циркуляции, произвести замер всех технологических параметров бурового раствора, по мере надобности дообработать эмульсию известью, эмульгатором до первоначальных концентраций.
7. В процессе бурения постоянно следить за изменением параметров раствора и ежедневно проводить восстановление исходного содержания воды и минерального масла.

Также хотелось бы остановиться на еще одной проблеме. При расчете объема бурового раствора, необходимого для бурения скважины, технические специалисты сервисных компаний и проектных институтов закладывают так называемый технический объем. Он включает в себя следующие пункты:

- потери на системе очистки со шламом;
- потери во время проведения спуско-подъемных операций;
- потери на фильтрацию бурового раствора в скважине.

На основании вышесказанного рекомендуется внести еще один пункт – потери раствора на испарение. Данный объем раствора должен рассчитываться, исходя из предполагаемых температур эмульсии на поверхности в емкостном парке, планируемых сроков строительства скважины. Безусловно, данный показатель будет приблизительным и не точным. Однако данный рассчитанный показатель позволит в какой-то степени компенсировать потери объема РУО на испарение.

Выводы

Вследствие малой изученности процесса испарения компонентов эмульсионных буровых растворов полученные результаты могут иметь широкие перспективы. Предлагаемая экспресс-методика исследования испарения РУО, а также математические уравнения расчета объема испарения фаз могут использоваться как в промысловых, так и в лабораторных условиях. Стандартный набор необходимых приборов, достоверность и простота расчета делает данную методику весьма эффективной и информативной. Представленный алгоритм восстановления концентраций позволит избежать осложнений и проблем, связанных с неправильной обработкой промысловочной жидкости.

Детальное исследование процесса испарения и полученные результаты могут повысить эффек-

тивность применения большинства современных РУО при строительстве скважин с высокими забойными температурами, уменьшить временные затраты на принятие решений по обработке и их

технологическое исполнение, а также затраты на восстановление свойств буровых растворов и предупреждение осложнений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давление насыщенных паров нефти при испарении с открытой поверхности / Ф.Ф. Абузова, Г.Д. Теляшева, А.П. Мухмутзянова, О.В. Валова // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 1988. – № 9. – С. 14–16.
2. Борьба с потерями нефти и нефтепродуктов при их транспортировке и хранении / Ф.Ф. Абузова, И.С. Бронштейн, В.Ф. Новоселов. – М.: Недра, 1981. – 248 с.
3. Коршак А.А. Современные средства сокращения потерь бензинов от испарения. – Уфа: Дизайн Полиграф Сервис, 2001. – 144 с.
4. Коршак А.А., Бусыгин Г.Н., Галляутдинов А.Б. О расходах через дыхательную арматуру резервуаров при «больших дыханиях» // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 1995. – № 7. – С. 11–12.
5. Okorie E., Anietie N., Francis D. A comparative study of diesel oil and soybean oil as oil-based drilling mud // Journal of Petroleum Engineering. – 2015. – V. 21. – P. 10–12.
6. An J., Lee K., Choe J. Well control simulation model of oil-based muds for HPHT wells // SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition. – Doha, 2015. – V. 12. – P. 17–19.
7. Lost circulation minimization strategy applied while drilling challenging profile well on Salym group of oil fields / A. Kharitonov, S. Pogorelova, A. Bakici, A. Antonov, A. Khomutov // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Moscow, 2015. – V. 3. – P. 24–26.
8. Батъкаев И.И., Еркебаева Г.Ш. Классификация и основные свойства углеводородных растворителей // Вести-Наука. – 2015. – № 5 (44). – С. 5–6.
9. Nelson R. Stock tank vapor recovery // Journal of Petroleum Engineering. – 2005. – V. 5. – P. 149–150.
10. Emerson R.H. Vapor Recovery: How it will Cost you // National Petroleum News. – 2006, April. – P. 76–83.
11. Boardman H. Storage of Volatile Petroleum Products // Petroleum Refiner. – 1996. – V. 25. – № 4. – P. 53–55.
12. Daojin Z. Applied properties of oil-based drilling fluids with montmorillonites modified by cationic and anionic surfactants // Applied Clay Science. – 2016. – V. 121–122. – P. 1–8.
13. Rubens R.F. Correlation between the gel-liquid transition stress and the storage modulus of an oil-based drilling fluids // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. – 2016. – V. 231. – P. 6–10.
14. Ming L. Contamination of cement slurries with diesel-based drilling fluids in a shale gas well // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2015. – V. 27. – P. 1312–1320.
15. Тирон Д.В., Уляшева Н.М. К вопросу о термодинамической неустойчивости растворов на углеводородной основе // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2015. – № 8. – С. 25–30.
16. Тирон Д.В. Методы исследования седиментационной устойчивости растворов на углеводородной основе // Наука и бизнес: пути развития. – 2015. – № 10. – С. 10–13.
17. Шаммазов А.М., Коршак А.А., Коршак С.А. Метод расчета суммарных потерь от «дыханий» резервуаров. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2001. – 288 с.
18. Уляшева Н.М. Технология буровых жидкостей. Ч. 1. – Ухта: УГТУ, 2008. – 198 с.
19. Грей Дж.Р., Дарли Г.С.Г. Состав и свойства буровых агентов (промывочных жидкостей) / пер. с англ. – М.: Недра, 1985. – 509 с.
20. Долгих А.Е., Ананьев А.Н., Новиков В.С. Исследование взаимодействия глинистых пород с растворами на углеводородной основе // Нефтяное хозяйство. – 1976. – № 12. – С. 22–25.
21. Минхайров К.Л., Наумов В.П., Бочкарев Г.П. Первый опыт применения гидрофобных эмульсионных растворов. – М.: Недра, 1970. – 182 с.

Поступила 11.02.2016 г.

Информация об авторах

Тирон Д.В., аспирант кафедры бурения Института геологии, нефтегазодобычи и трубопроводного транспорта Ухтинского государственного технического университета.

Уляшева Н.М., кандидат технических наук, профессор, заведующая кафедрой бурения Института геологии, нефтегазодобычи и трубопроводного транспорта Ухтинского государственного технического университета.

UDC 622.245.224

THE RESEARCH OF PHASE EVAPORATION IN OIL-BASED MUDS

Denis V. Tiron¹,
denistiron@mail.ru

Nadezhda M. Ulyasheva¹,
zav_bs@ugtu.net

¹ Ukhta State Technical University,
13, Pervomaiskaya street, Ukhta, 169300, Russia.

The research of phase evaporation in oil-based mud is an important task and it has practical significance for specialists engaged in engineering support of drilling muds.

The main aim of the study is to develop the method for studying the evaporation oil-based mud components, to study the kinetics of evaporation of hydrocarbon and water phases, and the degree of change in technological characteristics of oil-based mud, to obtain the algorithm of restoring the original concentrations of emulsion.

The methods used in the study: the authors' express method of researching evaporation of oil-based mud components, retort analysis, electrical stability analysis and methods for determining technological characteristics of drilling fluids by API (American Petroleum Institute) standards.

The results. The authors have developed the express method of researching evaporation of the oil-based mud components. It was ascertained that significant evaporation of water and hydrocarbon phases occurs at 60 °C and the process is divided into two stages: active evaporation, significant reduction in mud weight due to the water phase evaporation (the first 4 hours), slow evaporation, alignment of the ratio of the volume of the evaporated phases (4–12 hours). It was ascertained that the emulsion rheological parameters grow intensively due to increased concentration of the solid phase and density at water and mineral oil evaporation. The authors introduced the specific volume of evaporation, depending on time, which allows calculating the amount of hydrocarbon and water needed to restore the initial concentration. The authors developed the algorithm of recovering initial concentrations of the oil-based mud components. Its application can greatly simplify the control over the washing liquid quality, increase the efficiency of the most modern oil-based muds when drilling with high downhole temperatures.

Key words:

Oil-based mud, mineral oil, phase evaporation, kinetics of evaporation, rheological properties, specific volume of evaporation, approximation.

REFERENCES

1. Abuzova F.F., Telyasheva G.D., Mukhmutzyanova A.R., Valova O.V. Pressure of oil saturated vapor at evaporation from the exposed surface. *Transport and storage of oil and hydrocarbons*, 1988, no. 9, pp. 14–16. In Rus.
2. Abuzova F.F., Bronshteyn I.S., Novoselov V.F. *Borba s poteryami nefti i nefteproduktov pri ikh transportirovke i khraneni* [Struggle with losses of oil and oil products during their transportation and storage]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 221 p.
3. Korshak A.A. *Sovremennye sredstva sokrashcheniya poter benzinov ot ispareniiya* [Modern means of reducing gasoline evaporative losses]. Ufa, Dizayn Poligraf Servis Publ., 2001. 144 p.
4. Korshak A.A., Busygin G.N., Galyautdinov A.B. Flow through aspiration valve tanks at big breath. *Transport and storage of oil and hydrocarbons*, 1995, no. 7, pp. 11–12. In Rus.
5. Okorie E., Anietie N., Francis D. A comparative study of diesel oil and soybean oil as oil-based drilling mud. *Journal of Petroleum Engineering*, 2015, vol. 21, pp. 10–12.
6. An J., Lee K., Choe J. Well control simulation model of oil-based muds for HPHT wells. *SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition*. Doha, 2015. Vol. 12, pp. 17–19.
7. Kharitonov A., Pogorelova S., Bakici A., Antonov A., Khomutov A. Lost circulation minimization strategy applied while drilling challenging profile well on Salym group of oil fields. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, 2015. Vol. 3, pp. 24–26.
8. Batkaev I.I., Erkebaeva G.S. Klassifikatsiya i osnovnye svoystva uglevodorodnykh rastvoriteley [Classification and basic properties of hydrocarbon solvents]. *Vesti-Nauka*, 2015, no. 5 (44), pp. 5–6.
9. Nelson R. Stock tank vapor recovery. *Journal of Petroleum Engineering*, 2005, vol. 5, pp. 149–150.
10. Emerson R.H. Vapor Recovery: How it will Cost You. *National Petroleum News*, 2006, April, pp. 76–83.
11. Boardman H. Storage of Volatile Petroleum Products. *Petroleum Refiner*, 1996, vol. 25, no. 4, pp. 53–55.
12. Daojin Z. Applied properties of oil-based drilling fluids with montmorillonites modified by cationic and anionic surfactants. *Applied Clay Science*, 2016, vol. 121–122, pp. 1–8.
13. Rubens R.F. Correlation between the gel-liquid transition stress and the storage modulus of an oil-based drilling fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2016, vol. 231, pp. 6–10.
14. Ming L. Contamination of cement slurries with diesel-based drilling fluids in a shale gas well. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, vol. 27, pp. 1312–1320.
15. Tiron D.V. K voprosu o termodinamicheskoy neustoychivosti rastvorov na uglevodorodnoy osnove [On the issue of thermodynamic instability of oil-based muds]. *Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more* [Construction of oil and gas station on land and sea]. Moscow, VNIIOENG Publ., 2015. No. 8, pp. 25–30.
16. Tiron D.V. Methods for researching sedimentation stability of oil-based muds. *Science and Business*, 2015, no. 10, pp. 10–13. In Rus.
17. Shammazov A.M., Korshak A.A., Korshak S.A. Metod rascheta summarnykh poter ot «dykhaniya» rezervuarov [Method for calculating the total losses from the «breathing» of tanks]. *Nauchno-tehnicheskie dostizheniya v gazovoy promyshlennosti* [Scientific achievements in gas industry]. Ufa, UGNTU Press, 2001. pp. 286–288.

18. Ulyasheva N.M. *Tehnologiya burovyykh zhidkostey* [The technology of drilling fluids]. Ukhta, UGTU Press, 2008. 198 p.
19. Grey Dzh.R. *Sostav i svoystva burovyykh agentov (promyvochnyykh zhidkostey)* [Composition and properties of drilling fluids]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 509 p.
20. Dolgikh A.E., Ananyev A.N., Novikov B.C. Issledovanie vzaimodeystviya glinistykh porod s rastvorami na uglevodorodnoy osnove [Research of interaction of clay rocks with oil-based muds]. *Neftyanoe khozyaistvo*, 1976, no. 12, pp. 22–25.
21. Minkhayrov K.L., Naumov V.P., Bochkarev G.P. *Pervy opyt primeneniya gidrojobnykh emulsionnykh rastvorov: tekhnologiya bureniya neftyanykh skvazhin* [The first experience in application of oil-based mud: oil drilling technology]. Moscow, Nedra Publ., 1970. 182 p.

Received: 11 February 2016.

Information about the authors

Denis V. Tiron, post graduate student, Ukhta State Technical University.

Nadezhda M. Ulyasheva, Cand. Sc., Head of the Drilling Department, Ukhta State Technical University.

УДК 551.583:551.345(571.1)

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КЛИМАТА В РАЙОНАХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ НА ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Решетько Маргарита Викторовна¹,
MRechetko@tpu.ru

Моисеева Юлия Александровна¹,
julchiky@mail.ru

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

Актуальность работы связана с необходимостью оценки изменений климата, влияющих на многолетнюю мерзлоту, в связи с возможным увеличением выбросов парниковых газов и увеличения аварийности на объектах промышленной, в том числе и нефтегазовой, инфраструктуры при таянии многолетнемерзлых пород.

Цель работы: исследование современных изменений характеристик климата, непосредственно влияющих на термическое состояние почвогрунтов в районах распространения многолетней мерзлоты севера Западной Сибири.

Методы исследования. Анализ многолетних изменений метеорологических данных включал в себя проверку нулевых гипотез о случайности и однородности рядов наблюдений и наличия тренда. Проверка на однородность осуществлялась с помощью теста Аббе, на случайность – критерием Питмена, на наличие тренда производилась с помощью критерия инверсий. Вывод о неслучайном изменении или нарушении однородности рядов соответствовал условию, когда расчетная статистика превышала соответствующее критическое значение при уровне значимости 0,05.

Результаты. Рассмотрены особенности климата севера Западной Сибири и его изменчивость в последние годы. Исследованы изменения температуры воздуха и почвогрунтов на глубинах 160 и 320 см, продолжительность прямой солнечной радиации, суммы атмосферных осадков и высоты снежного покрова на основе инструментальных данных за последние 35 лет. В результате статистического анализа установлено сохранение темпов роста температуры воздуха в теплое время года, увеличение температуры почвогрунтов в течение всего года, выявлен зональный характер изменения суммы атмосферных осадков и снежного покрова. Микроклиматические изменения характеристик метеорологических величин могут исказить реальную картину изменения климата.

Ключевые слова:

Север Западной Сибири, многолетнемерзлые породы, изменение климата, статистический анализ, температура почвогрунтов.

Введение

Изменения глобального климата, регистрируемые на всей планете, проявляются по-разному: это и уменьшение размеров ледников в Арктическом регионе [1]; прогнозируемое резкое увеличение годовой амплитуды температуры поверхности моря в Северном Ледовитом океане из-за уменьшения площади морского льда [2]; снижение интенсивности и продолжительности гололедно-изморозевых явлений на территории России [3], а также высокий уровень пространственной и временной неоднородности гидрологических последствий изменения климата для рек Арктического региона [4] и Западной Сибири [5], причем вероятность и масштабы негативного воздействия гидрологических явлений и процессов возрастают с увеличением интенсивности изменений климата и антропогенных воздействий. На большей части территории распространения многолетнемерзлых пород в различные сезоны года отмечается повышение температуры воздуха, вариации характеристик снежного и растительного покрова, увеличение экстремальности климата. Это, несомненно, оказывает влияние на термическое состояние пород, изменяя их прочностные свойства, что может сопровождаться увеличением интенсивности экзогенных процессов и негативными последствиями для инфра-

структуры промышленных и гражданских объектов. Возможен также рост эмиссии метана при таянии многолетнемерзлых пород (ММП) и газовых гидратов донных отложений в Арктике. Таяние вечной мерзлоты может привести к важным обратным связям в климатической системе, например оказать существенное влияние на распределение атмосферного озона [6]. Есть большие неопределенности, связанные с изменением содержания озона и метана из-за таяния вечной мерзлоты. По мнению [7], общепринятые оценки годовой интенсивности арктических потоков метана могут быть заниженными по отношению к реальным потокам.

Современное состояние исследований

Территория широкого распространения мощного слоя многолетнемерзлых пород привлекла внимание ученых [8–25] с середины XX в., с момента освоения северных территорий в связи с разработкой нефтегазовых месторождений, строительства нефтяных и газовых трубопроводов, хотя наблюдения за многолетнемерзлыми грунтами в России проводились еще с 1837 г. (в Якутске). Исследования отклика ММП на изменения климата проводились с помощью геотермических изменений в скважинах [8, 9] и геокриологических исследований по программе циркумполярного монито-

ринга деятельного слоя (Circumpolar Activelayer Monitoring, CALM) [8, 10–12], и статистического анализа временного хода метеорологических характеристик, таких как температура воздуха [8, 17–22, 25] и почвогрунтов на разных глубинах [8, 13, 14, 17–22, 25, 26], высота снежного покрова [8, 15, 16] и влияние изменений температуры воздуха и высоты снежного покрова на изменения температуры почвогрунтов [8, 19–26].

Согласно [8] при сравнении результатов современных наблюдений в скважинах с литературными и архивными данными обнаружен устойчивый тренд повышения температуры многолетнемерзлых пород на подавляющем большинстве точек наблюдения в период с 1980 по 2010 г. В разных регионах температура ММП на глубине нулевых годовых амплитуд повысилась на 0,5–2 °С [9]. Потепление происходило главным образом в 70–90-е гг. В начале XXI в. температура мерзлоты на большей части наблюдаемых регионов оставалась стабильной. Тенденция к повышению температуры многолетнемерзлых пород возобновилась только к 2010 г. [8]. В Западной Сибири в пределах некоторых типов ландшафтов в настоящее время повышение температуры ММП достигло критических значений, что привело к формированию новых несквозных таликов, а также к углублению уже существующих.

По данным геокриологических исследований по программе циркумполярного мониторинга деятельного слоя [10] скорость увеличения мощности сезонно-талого слоя (СТС) на трех площадках Западной Сибири составляет от 0 до 2 см/год. Всего в Западной Сибири восемь площадок, но только три имеют продолжительность наблюдений более 10 лет, включая площадку Надым, наблюдения на которой проводятся с 1971 г. В целом по России тренд величины СТС уменьшается по мере продвижения в восточные районы российской криолитозоны [8].

Результаты анализа [11, 12] показали, что за период с 1975 по 2010 г. наблюдается статистически значимое увеличение толщины активного слоя (глубины сезонного протаивания) многолетнемерзлых пород в различных районах криолитозоны Северного полушария, составившее в среднем около 1 см в год. Глубина протаивания возрастала в зонах распространения многолетней мерзлоты различной степени сплошности независимо от видов растительных покровов, почв и влажности грунтов.

Объект, материалы и методы исследования

Около половины территории Западно-Сибирской низменности занято многолетнемерзлыми породами. Район исследования расположен на севере Западной Сибири, простираясь с севера на юг от 73°50' (о. Диксон) до 62°45' с. ш. (п. г. т. Октябрьское) и с запада на восток от 60°88' (с. Саранпауль) до 88°30' в. д. (г. Норильск). Южная граница распро-

странения многолетнемерзлых пород в центральной и восточной частях равнины проходит между 60° и 61° с. ш., постепенно поднимаясь в северо-западном направлении до 63° с. ш. Мощность ММП возрастает с увеличением абсолютных высот и уменьшается под долинами, нарастание мощности происходит с юга на север (в среднем изменение составляет 400–1100 м) [27]. Температура многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской низменности зависит от географической широты и ряда других местных факторов. С севера на юг отмечено закономерное повышение температуры мерзлых пород на подошве слоя сезонных колебаний температуры (на глубине от 5–6 до 15–20 м) от –7...–10 °С до 0 °С. Довольно резкое повышение температуры мерзлых пород на 1–2 °С наблюдается при переходе от тундры к лесной зоне [28].

Мощность слоя сезонного оттаивания мерзлоты увеличивается с севера на юг и колеблется в зависимости от литологического состава отложения, расчлененности рельефа и высоты над уровнем моря, толщины снежного покрова, температуры воздуха, водонасыщенности и теплопроводности отложений, растительного покрова и пр. [28]. Глубина сезонного протаивания на вечномерзлых грунтах рек Обь, Надым, Пур и Таз – менее 1,0 м и сезонного промерзания на талых грунтах – 1,0–2,5 м. На севере территории глубина сезонного протаивания до 2 м, в центральной и южной частях протаивание на вечномерзлых грунтах 0,5–1 м промерзание до 2 м, в южной более 2 м [29].

Территория района исследований располагается в трех климатических зонах: арктической, субарктической и умеренной [29]. Особенности климата определяются близостью Карского моря, обилием заливов, рек, болот и озер.

В целом для территории характерна длительная зима (7–8 месяцев), среднемесячные температуры которой составляют –23...–29 °С, а минимальные достигают –60 °С. Суровость климата увеличивается сильными ветрами. На арктическом побережье Западной Сибири годовые суммы осадков не превышают 300–350 мм/год. К югу района исследований количество осадков увеличивается (500–550 мм/год). Наибольшее количество осадков выпадает в июле [29]. Снежный покров зимой формируется в основном в первую половину холодного периода. Высота снежного покрова на наветренных склонах Среднесибирского плоскогорья достигает 80 см, на северо-востоке – лишь 30–40 см, что не предохраняет почву от промерзания. Мощность снежного покрова в конце зимы составляет 50–70 см. Число дней со снежным покровом – 220–270 [27]. Летом усиливается циклоническая деятельность. Из-за частых северных ветров и пасмурной погоды лето прохладное. Средняя температура июля изменяется от 10 до 14 °С, максимальная температура воздуха иногда достигает 30 °С. На протяжении всего лета возможны за-

морозки и выпадение снега. Лето продолжается в среднем около 40–60 дней. Среднегодовая температура воздуха территории $-5...-7^{\circ}\text{C}$, в отдельных районах составляет -10°C .

Авторами исследованы характеристики метеорологических величин, такие как температура воздуха и почвогрунтов, продолжительность прямой солнечной радиации, сумма атмосферных осадков, высота снежного покрова, являющиеся приоритетными при проведении мониторинга криолитозоны.

Для исследования многолетних изменений характеристик метеорологических величин были использованы специализированные массивы данных 19 метеостанций севера Западной Сибири за период с 1980 по 2014 г. Данные двух из расположенных на исследуемой территории 21 метеостанций (рис. 1) не использовались, ввиду отсутствия непрерывного ряда наблюдений (на метеостанциях

Халесовая и Янов Стан данные отсутствуют с 1993 по 1996 г.). Выявлено, что за исследуемый период метеостанция в п. г. т. Березово была перенесена в 1983 г. на 1,5 км к юго-западу.

Анализ многолетних изменений как месячных, так и суточных данных продолжительности прямой солнечной радиации, температуры воздуха, суммы атмосферных осадков, температуры почвогрунтов на глубинах 160 и 320 см и высоты снежного покрова [30, 31] включал в себя проверку нулевых гипотез об однородности рядов наблюдений с помощью критерия Аббе [32], о случайности и наличии тренда с помощью критерия Питмена и критерия инверсий соответственно [33, 34]. Вывод о неслучайном изменении или нарушении однородности рядов соответствовал условию, когда расчетная статистика превышала соответствующее критическое значение при уровне значимости 0,05.

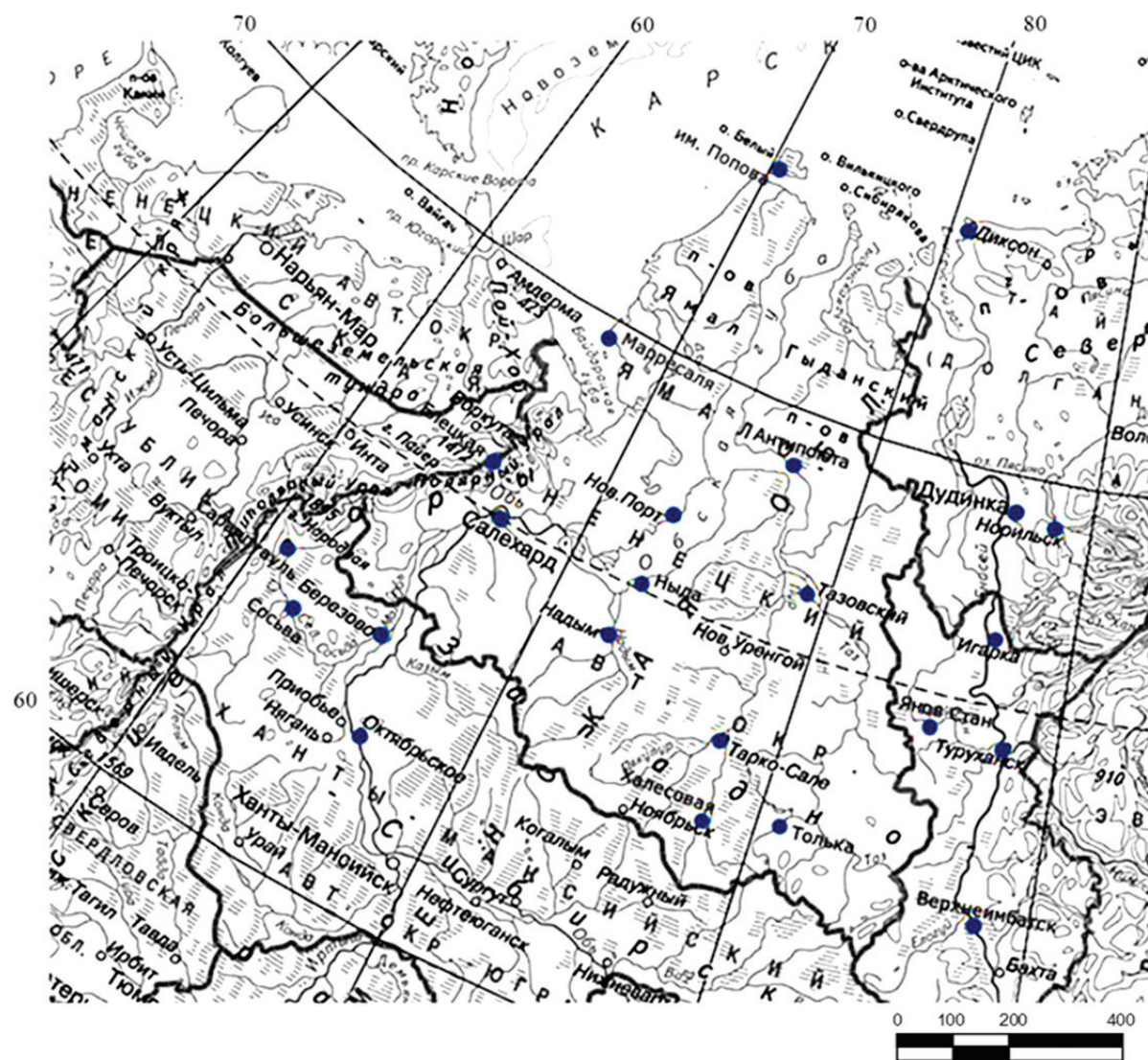


Рис. 1. Карта-схема расположения метеостанций [29] с дополнениями автора

Fig. 1. Map of location of meteorological stations [29] with the additions of the author

Результаты и их обсуждение

При проверке нулевых гипотез об однородности рядов наблюдений выявлено, что неоднородными являются среднемесячные значения суммы атмосферных осадков в холодный период года (с октября по февраль); продолжительность прямой солнечной радиации в летние и зимние месяцы. Ряды наблюдений за высотой снежного покрова являются неоднородными преимущественно в зимнее и весеннее время (с декабря по май), а ряды температуры воздуха неоднородны в летне-осеннее период (с июня по ноябрь); ряды наблюдений за температурой почвогрунтов на глубине 160 см неоднородны в весенние месяцы, а на глубине 320 см неоднородны во все сезоны года.

Обработка результатов является полноценной только в том случае, когда используются однородные ряды или учитывается неоднородность ряда. В метеорологических рядах различают климатологическую и статистическую неоднородность. Причем если появление климатологической неоднородности зависит от человеческого фактора (ошибки методического характера), то статистическая неоднородность вызвана естественными причинами.

Существуют две главные причины нарушения однородности ряда [35]. Первая состоит в том, что вследствие изменения действий основных климатообразующих или антропогенных факторов в рядах имеется детерминированная, или, как принято говорить, «трендовая», составляющая. Выявление такого вида неоднородности позволяет судить о тенденции изменения климата. Данный вид неоднородности ряда, вызванный действием естественных природных факторов, обычно называют статистической неоднородностью или нестационарностью. Вторая причина возможных нарушений однородности ряда состоит в изменении условий и методики наблюдений, ее принято называть климатологической [35]. Изменение метеорологического режима может быть вызвано либо изменением микроклимата, либо неправильной работой приборов в определенных местных условиях, что может приводить к большим ошибкам как случайного, так и систематического характера. Изменение деятельной поверхности на обширных территориях, что в настоящее время характерно для районов севера Западной Сибири, могут сказываться на интенсивности изменений характеристик метеорологических величин, имитируя изменения климата. Микроклиматические изменения характеристик метеорологических величин, обусловленные воздействием антропогенных факторов, могут исказить реальную картину изменения климата.

Некоторая часть этих неоднородностей, вероятно, вызвана нарушением однородности условий наблюдений, которые не удалось надежно выявить из-за невозможности проследить изменения деятельной поверхности за исследуемый период во-

круг метеостанций; часть же, возможно, относится к естественной структуре рядов метеорологических величин, характеристики которых изменяются от года к году или от некоторого периода лет к другому периоду лишь в соответствии с естественной изменчивостью макропроцессов, оказывающих влияние на погоду и климат данного района.

В результате анализа исследуемых характеристик метеорологических величин на наличие тренда для 19 метеостанций, где имеются данные, в среднем на 26,8 % метеостанций обнаружены тренды среднегодовых данных, а для рядов некоторых среднемесячных значений тренд установлен на 52 % метеостанций (подробнее в табл. 1).

При выполнении статистического анализа установлено, что для 80 % рядов, в которых обнаружен тренд с помощью критерия инверсий, наличие тренда подтверждено результатами проверки гипотезы о случайности с помощью критерия Питмена.

Таблица 1. Количество метеостанций, на которых выявлены статистически достоверные тренды

Table 1. Number of meteorological stations with statistically significant trends

| Исследуемые характеристики Test characteristics | Количество метеостанций, где The number of meteorological stations, where | | |
|--|--|---|--|
| | имеются данные data are available | установлен тренд среднегодовых значений trend of average annual values was established | наблюдается тренд только для некоторых среднемесячных значений trend is observed only for some monthly averages values |
| Температура воздуха Air temperature | 18 | 1 | 15 |
| Температура почвогрунтов на глубине Soil temperature at a depth | 160 см/cm | 7 | 2 |
| | 320 см/cm | 4 | 3 |
| Сумма атмосферных осадков Amount of precipitation | 17 | 5 | 12 |
| Высота снежного покрова Snow depth | 18 | 4 | 6 |
| Продолжительность солнечного сияния Sunshine duration | 11 | 0 | 11 |

В результате анализа данных временных рядов продолжительности прямой солнечной радиации выявлены тренды средних значений преимущественно в зимние месяцы (январь и февраль), увеличение составляет от 0,15 до 1,5 ч/год на всей территории исследования и в ноябре вблизи побережья Обской и Тазовской губы, уменьшение величин наблюдается в с. Березово в ноябре (на 0,56 ч/год) и п. г. т. Елецкий в августе (на 1 ч/год).

На территории севера России учеными [17–19, 26] выявлено повышение температуры воздуха за период 1965–1995 гг. на 1,1–1,2 °С (в отдельных пунктах более 2 °С), во второй половине 1990-х гг. темпы потепления климата снизились, в 2001–2005 гг. температура воздуха повысилась в отдельных пунктах на европейском севере и севере Западной Сибири, но не более чем на 0,3–0,4 °С. В среднем по всему северу России потепление климата оценивается за 2001–2005 гг. как очень слабое (около +0,1 °С за пять лет) [26].

При исследовании величин многолетних изменений температуры воздуха на всей территории увеличение температуры воздуха выявлено только в мае (рис. 2) и июне, что говорит о продолжающейся тенденции к потеплению в теплое время года и подтверждает ранее выявленные изменения в [17–19, 26]. Наибольшее увеличение среднемесячных значений за исследуемый период наблюдается в восточной части на 0,1 °С/год, на западе со стороны Уральских гор на 0,07 °С/год, за исключением м/с Елецкая, на побережье Карского моря в среднем на 0,09 °С/год и в центральной части района, где температура воздуха увеличивается на 0,08 °С/год. Тренды статистически не доказаны в прибрежной части Обской губы (м/с Новый порт и Ныда).

Рост температуры воздуха может быть связан с тепловым воздействием урбанизированных территорий, но их влияние не столь значительно в исследуемом районе. Одной из причин роста, возможно, является увеличение продолжительности прямой солнечной радиации. Авторами найдена линейная связь между среднемесячными значениями продолжительности прямой солнечной радиации и температуры воздуха в июне в с. Тазовское ($R^2=0,69$).

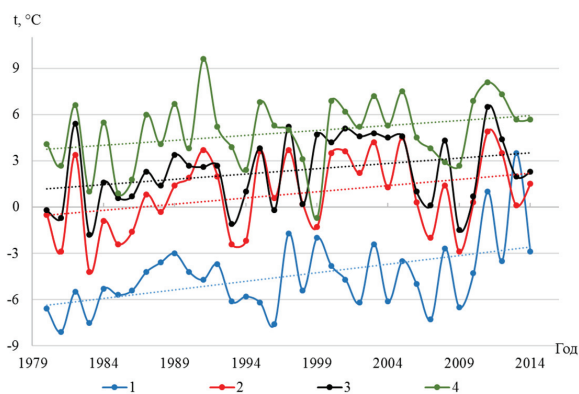


Рис. 2. Многолетние изменения температуры воздуха в мае с линейным трендом на метеостанциях Дудинка (1), Надым (2), Толька (3) и Саранпауль (4) за период 1980–2014 гг.

Fig. 2. Long-term changes of air temperature in May with the linear trend at the meteorological stations in Dudinka (1), Nadym (2) Tolka (3) and Saranpaul (4), 1980–2014

Изменение среднегодовой температуры почвы в 1961–1995 гг. [13] в основном соответствовало изменению среднегодовой температуры воздуха. На всей территории криолитозоны отмечались поло-

жительные тренды температуры почвы. Наибольшие локальные тренды повышений температуры почвы на глубине 320 см за период с 1965 по 2005 г. (до 0,04–0,06 °С/год) отмечаются и для условий севера Западной Сибири [14, 25, 26]. Однако, несмотря на сильное потепление климата, криолитозона сохраняет высокую устойчивость в отношении стабильности термических показателей грунтов.

Для температуры почвогрунтов на глубине 160 см в результате проведенного анализа положительные тренды выявлены преимущественно с октября по январь в западной части района исследования и в восточной (+0,02 °С/год), а в летние месяцы (июль и август), по данным метеостанции с. Толька, наблюдается уменьшение температуры до 0,06 °С/год. На глубине 320 см температура на протяжении всего года увеличивается в среднем на 0,01 °С/год. Полученные результаты свидетельствуют об уменьшении величины тренда температуры почвогрунтов на глубине 320 см, по сравнению с [14, 26], но тенденция к увеличению сохраняется.

Повышение температуры воздуха и связанное с ним повышение температуры почвогрунтов оказывает влияние на увеличение температуры подземных вод.

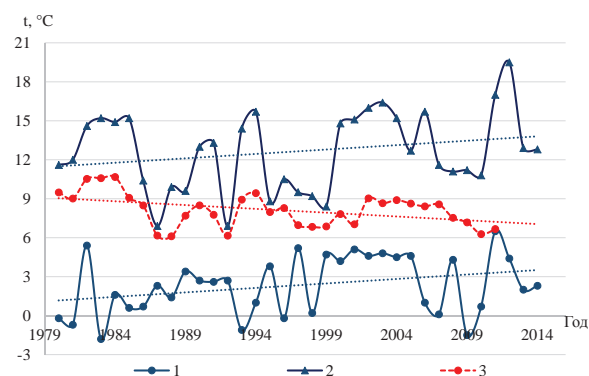


Рис. 3. Многолетнее изменение температуры воздуха в мае (1) и июне (2) и почвогрунтов на глубине 160 см в июле (3) в с. Толька, 1980–2014 гг.

Fig. 3. Long-term changes in air temperature in May (1) and in June (2) and soil temperature at a depth of 160 cm in July (3) in Tolka, 1980–2014

По данным метеостанции в с. Толька выявлены отрицательные тренды температуры почвогрунтов на глубине 160 см в июле и августе (рис. 3), при этом для временных рядов температуры воздуха этой же метеостанции статистически достоверный тренд выявлен в мае и наблюдается тенденция к увеличению в июне, следовательно, температура почвы на глубине 160 см должна увеличиваться или оставаться неизменной (согласно третьему закону Фурье годовые максимумы и минимумы температуры запаздывают на каждый метр глубины на 20–30 суток). Возможной причиной выявленного факта может быть как климатологическая неоднородность, так и нарушение закона Фурье из-за инфильтрации талых вод в переходные сезо-

ны года. Согласно [16] на большей части Сибири с 1966 г. запас воды в снеге растет или не изменяется, в то время как продолжительность периода со снегом на земле сократилась в основном из-за более раннего снеготаяния.

Источников положительного тренда хода температур почвогрунтов в исследуемом районе могло быть несколько. С одной стороны, как уже упоминалось, это реальные изменения климата; с другой стороны, существуют многолетние изменения деятельной поверхности почвы в месте установления термометров, не замечаемые наблюдателем. Зимой это различие в залегании снега из-за изменения защищенности места, связанного с постепенной застройкой окружающей территории или вырубкой леса. Летом в зависимости от антропогенного изменения деятельной поверхности почвы, которая непосредственно получает и отдает тепло, постепенной смены растительности и уплотнения почвы меняются и условия нагревания почвогрунтов, поразному изменяется температурный режим в разных средах из-за различия в теплопроводности и теплоемкости талого и мерзлого грунтов [8]. Известно, что отклик многолетней мерзлоты на изменение климата существенно зависит от исходного термического состояния ММП и местного разнообразия ландшафтов [8], различия трендов температуры воздуха и ММП обусловлены затратами тепла на оттаивание ММП. Этот фактор особенно сильно проявляется в высокотемпературных (с температурой, близкой к 0 °С) ММП в островной криолитозоне. Авторами [36] установлено, что даже при значительном потеплении тепловое состояние приповерхностных слоев вечной мерзлоты демонстрирует устойчивость; но антропогенное воздействие на почвенный покров, такое как рубка лесов, разрушение естественного почвенного покрова и последствия пожаров приводят к значительному повышению температуры почвогрунтов и глубины сезонного оттаивания, а также активизации неблагоприятных криогенных процессов. При потеплении приземного слоя атмосферы происходит постепенное оттаивание пород сверху и уменьшение площадей островов мерзлоты, на что расходуется значительная часть поступающей тепловой энергии. Мерзлый грунт проводит тепло лучше, чем талый, поэтому даже при равной продолжительности холодного и теплого периодов теплотери зимой будут больше, чем поступление тепла летом [8].

Характер трендов многолетнего изменения температуры почвогрунтов в районах многолетней мерзлоты определяются не только изменениями температуры воздуха, но и во многом определяется изменением характеристик снежного покрова, поскольку он является хорошим теплоизолятором.

Результаты, приводимые в работах [23–25], свидетельствуют о том, что многолетние изменения среднегодовой температуры грунтов в Сибири определяются в большей мере изменениями высоты снежного покрова (до 50 %), чем изменениями

температуры воздуха (0–5 %). Пространственный анализ корреляций между зимней температурой почвогрунтов на глубинах и высотой снежного покрова в феврале показал, что на глубинах 80 и 160 см преобладают значимые положительные коэффициенты корреляции $k=0,4-0,6$ на огромной территории России от Предуралья до восточных границ континента. Исключение составляют районы Северо-Сибирской низменности с корреляцией около нуля на глубинах 80 и 160 см [23].

Установлено [8], что в Сибири многолетние изменения среднегодовой температуры грунтов на глубине 320 см в большей степени определяются изменениями высоты снежного покрова, что приводит к дополнительному повышению среднегодовой температуры почвогрунтов и ускоренному ее росту по сравнению с трендами потепления нижней атмосферы. Это обстоятельство приобретает особое значение в зоне многолетней мерзлоты, так как усиливает одну из составляющих ее возможной деградации. Влияние высоты снежного покрова на температуру почвогрунтов прослеживается почти на всей территории многолетней мерзлоты. Наибольшие современные термические изменения в верхних горизонтах криолитозоны происходят при одновременном повышении температуры воздуха и высоты снежного покрова. Если тенденции изменения температуры воздуха и толщины снега не однонаправлены, термическое состояние многолетней мерзлоты меняется не столь сильно или же вообще остается неизменным [8]. В результате исследований установлено, что увеличение температуры почвогрунтов может наблюдаться при отсутствии положительных трендов среднегодовой температуры воздуха и высоты снежного покрова. На рис. 4 представлены многолетние изменения данных характеристик на метеостанции с. Туруханск. Возможной причиной может служить антропогенное воздействие на термический режим почвогрунтов.

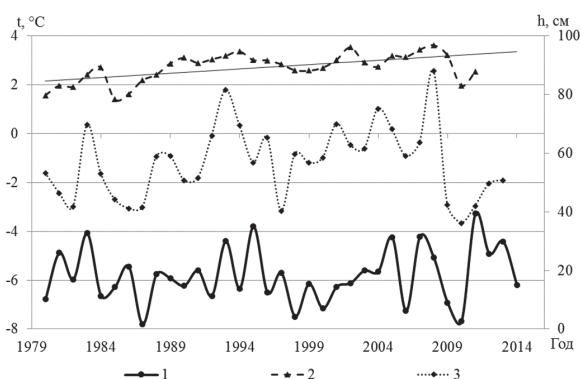


Рис. 4. Многолетние изменения среднегодовой температуры воздуха (1), температуры почвогрунтов на глубине 320 см (2) и высоты снежного покрова (3), м/с, Туруханск, 1980–2014 гг.

Fig. 4. Long-term changes in air temperature (1) and soil at a depth of 320 cm (2) and depth of snow cover (3), Turukhansk, 1980–2014

По результатам исследований авторов установлено, что изменения суммы атмосферных осадков и снежного покрова имеют зональный характер.

Увеличение величин высоты снежного покрова наблюдается с января по апрель на 8,6 см/10 лет в пределах границ атлантической области субарктического пояса; уменьшение – в пределах атлантической области арктического пояса и континентальной западно-сибирской северной области умеренного пояса на 0,3 см/10 лет и 0,6 см/10 лет соответственно. В западной части территории изменений не выявлено.

В ходе исследования многолетних изменений суммы атмосферных осадков по данным метеостанций Маррессаля и с. Толька изменений уровня средних значений ряда не выявлено. В летние месяцы тренд статистически не доказан. В октябре и ноябре наблюдается увеличение месячных сумм осадков на западе в нижнем течении реки Оби на 7 мм/год, а на территории бассейнов рек Надым, Пур и Таз увеличение в среднем составляет 6 мм/год в марте, при этом по мере продвижения на север, к побережью Карского моря, происходит уменьшение месячных сумм осадков в апреле (4 мм/год) и в ноябре (3 мм/год). В декабре наблюдается уменьшение месячных сумм осадков на 6,6 мм/год по данным метеостанций с. Туруханск и с. Новый Порт.

Согласно [37] внутригодовое перераспределение атмосферного увлажнения, а именно рост количества атмосферных осадков в летне-осенний период, может вызвать некоторое увеличение уровней подземных вод. Следовательно, выявленное авторами внутригодовое перераспределение атмосферного увлажнения в исследуемом районе может повлиять на изменение уровней подземных вод.

Отмечаемое в последние десятилетия потепление климата влияет на Арктический регион и может оказать существенное влияние на дестабилизацию и деградацию вечной мерзлоты, в том числе и на Арктическом шельфе [38, 39], что приведет к непредсказуемым последствиям. С другой стороны, в ближайшие десятилетия, согласно сценарию изменения климата [40], не только сохранится продолжающаяся уже 15 лет стабилизация температуры, но и возможно некоторое похолодание. Следует подчеркнуть, что вопрос климатологической неоднородности многолетних рядов характеристик метеорологических величин требует серьезного учета при исследованиях для обоснованного прогноза изменений климата.

Выводы

На территории широкого распространения многолетнемерзлых пород с момента освоения северных районов проводились исследования отклика ММП на изменения климата с помощью геотермических изменений и геокриологических исследований, статистического анализа характеристик метеорологических величин и др. Выводы в публи-

кациях разных авторов по вопросу направлений и величины изменений характеристик метеорологических величин не всегда согласуются между собой в основном из-за использования ограниченного числа точек наблюдений, коротких рядов или, возможно, использования данных метеостанций, имеющих климатологическую неоднородность.

В результате статистического анализа многолетних изменений:

- установлено увеличение продолжительности прямой солнечной радиации (от 0,15 до 1,5 ч/год) преимущественно в холодное время года на всей территории и уменьшение в августе и ноябре в восточной части области исследования (0,5–1 ч/год);
- установлено продолжающееся увеличение температуры воздуха в мае и июне в среднем на 0,08 °С/год преимущественно на всех точках исследования, кроме прибрежной части Обской губы (изменений не выявлено);
- обнаружены разнонаправленные тенденции температуры почвогрунтов: на глубине 160 см преимущественно с октября по январь в западной и в восточной части района исследования наблюдается увеличение, а в летние месяцы (июль и август), по данным метеостанции с. Толька, наблюдается уменьшение температуры до 0,06 °С/год. На глубине 320 см температура увеличивается в среднем на 0,01 °С/год. Ряды данных по температуре почвогрунтов могут иметь климатологическую неоднородность, вызванную нарушением однородности условий наблюдений в результате антропогенной деятельности, а выявить произошедшие изменения деятельной поверхности вблизи метеостанций за исследуемый период авторами не представляется возможным;
- выявлен зональный характер изменения суммы атмосферных осадков и снежного покрова. В октябре и ноябре наблюдается увеличение месячной суммы атмосферных осадков на западе в нижнем течении р. Оби (7 мм/год), а в районах бассейнов рек Надым, Пур и Таз увеличение происходит в марте (6 мм/год). По мере продвижения на север, к побережью Карского моря, происходит уменьшение величин суммы атмосферных осадков в апреле (4 мм/год) и в ноябре (3 мм/год). Изменения высоты снежного покрова происходит зонально, рост значений достигает 8,6 см/10 лет, а уменьшения – 0,6 см/10 лет. При этом в западной части района изменений не выявлено.

Повышение температуры воздуха, которое наблюдается в различные сезоны года на исследуемой территории, изменение характеристик снежного и растительного покрова, увеличение экстремальности климата, несомненно, оказывает влияние на состояние почвогрунтов в зоне многолетней мерзлоты Севера Западной Сибири. Установленные авторами разнонаправленные тенденции из-

менения температуры почвогрунтов не позволяют говорить об однозначном увеличении выброса метана на исследуемой территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Glacier changes in the circumpolar Arctic and sub-Arctic, mid-1980s to late-2000s/2011 / S.H. Mernild, J.K. Malmros, J.C. Yde, S. De Villiers, N.T. Knudsen, R. Wilson // *Geografisk Tidsskrift – Danish Journal of Geography*. – 2015. – V. 115 – № 1. – P. 39–56.
2. Carton J.A., Ding Y., Arrigo K.R. The seasonal cycle of the Arctic Ocean under climate change // *Geophysical Research Letters*. – 2015. – V. 42. – № 18. – P. 7681–7686.
3. Icing conditions over Northern Eurasia in changing climate / O.N. Bulygina, N.M. Arzhanova, P.Ya. Groisman // *Environmental research letters*. – 2015. – V. 10. – № 2 – P. 11.
4. Bring A., Destouni G. Arctic Climate and Water Change: Model and Observation Relevance for Assessment and Adaptation // *Surveys in Geophysics*. – 2014. – V. 35. – Iss. 3. – P. 853–877.
5. Hydrological risks in Western Siberia under the changing climate and anthropogenic influences conditions / V.A. Zemtsov, V.V. Paromov, S.G. Kopysov, A.V. Kouraev, S.V. Negrul // *International Journal of Environmental Studies*. – 2014. – V. 71. – № 5. – P. 611–617.
6. Atmospheric Ozone and Methane in a Changing Climate / I.S.A. Isaksen, T.K. Berntsen, S.B. Dalsøren, K. Eleftheratos, Y. Orsolini, B. Rognerud, F. Stordal, O.A. Søvde, C. Zerefos, C.D. Holmes // *Atmosphere*. – 2014. – V. 5. – P. 518–535.
7. Modeling the Influence of Methane Emissions from Arctic Gas Hydrates on Regional Variations in Composition of the Lower Atmosphere / S.P. Smyshlyaeva, E.A. Mareev, V.Ya. Galinc, P.A. Blakitnaya // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2015. – V. 51. – № 4. – P. 412–422.
8. Семенов С.М. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем: монография. – М.: Росгидромет, 2012. – 511 с.
9. Thermal state of permafrost in Russia / V.E. Romanovsky, D.S. Drozdov, N.G. Oberman, G.V. Malkova et al. // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2012. – V. 21. – P. 136–155.
10. Мажитова Г.Г., Каверин Д.А. Динамика глубины сезонного протаивания и осадки поверхности почвы на площадке циркулярного мониторинга деятельного слоя (CALM) в европейской части России // *Криосфера Земли* – 2007. – Т. XI. – № 4. – С. 20–30.
11. Brown J., Hinkel K.M., Nelson F.E., The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) Program: Research designs and initial results // *Polar Geography*. – 2000. – V. 24. – № 3. – P. 165–258.
12. Дзюба А.В., Зекцер И.С. Климатический криолитозон: влияние деградации криолитозоны на климат // *Науки о Земле*. – 2011. – С. 260–272. URL: http://www.rfbr.ru/rffi/ru/popular_science_articles/o_1894459 (дата обращения: 07.11.2015).
13. История наблюдений за температурой почвы на сети метеорологических станций России / С.С. Быховец, В.А. Сорокиных, Р.А. Мартуганов, В.Г. Мамыкин, Д.А. Гиличинский // *Криосфера Земли* – 2007. – Т. XI. – № 1. – С. 7–20.
14. Павлов А.В., Малкова Г.В. Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на Севере России // *Криосфера Земли* – 2009. – Т. XIII. – № 4. – С. 32–39.
15. Бульгина О.Н., Коршунова Н.Н., Разуваев В.Н. Изменения характеристик снежного покрова на территории России в последние десятилетия // *Труды ГУ «ВНИИГМИ МЦД»*. – Обнинск, 2007. – Вып. 178. – С. 54–62.
16. Climate changes in Siberia / P.Ya. Groisman, T.A. Blyakharchuk, A.V. Chernokulsky et al. // *Regional environmental changes in Siberia and their global consequences*. Ch. 3. – Dordrecht: Springer, 2013. – P. 57–109.
17. Изменение климата в районах вечной мерзлоты на территории России / Ю.А. Израэль, Ю.А. Анохин, Л.Т. Мяч, А.Б. Шерстюков // *Материалы международной конференции «Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз её изменений»*. – Тюмень: Нефтегазовый университет, 2006. – Т. I. – С. 72–75.
18. Оценка возможных экологических и экономических последствий изменения климата в районах вечной мерзлоты / Ю.А. Израэль, Ю.А. Анохин, Л.Т. Мяч, А.Б. Шерстюков // *Тезисы докладов Всероссийской конференции «Научные аспекты экологических проблем России»*. – М.: Гидрометеиздат, 2006. – С. 19–20.
19. Статистические оценки изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на территории Российской Федерации / Ю.А. Израэль, А.В. Павлов, Ю.А. Анохин, Л.Т. Мяч, А.Б. Шерстюков // *Метеорология и гидрология*. – 2006. – Т. 5. – С. 27–38.
20. Алфимов А.В., Берман Д.И. Подснежные температуры и почвенная биота в северной Евразии // *Науки о Земле*. – 2007. – С. 1–8. URL: http://www.rfbr.ru/rffi/ru/popular_science_articles/o_16747 (дата обращения: 07.11.2015).
21. Павлов А.В., Гравис Г.Ф. Вечная мерзлота и современный климат // *Науки о Земле*. – 2000. – С. 1–9. URL: http://www.rfbr.ru/rffi/ru/popular_science_articles/o_16473 (дата обращения: 07.11.2015).
22. Anisimov O.A., Reneva S.A. Permafrost and changing climate: the Russian perspective // *Ambio*. – 2006. – № 4. – P. 169–175.
23. Шерстюков А.Б., Шерстюков Б.Г. Пространственные особенности и новые тенденции в изменениях термического состояния почвогрунтов и глубины их сезонного протаивания в зоне многолетней мерзлоты // *Метеорология и климатология*. – 2015. – Т. 40. – № 2. – С. 73–78.
24. Nicsolsky D.J., Romanovsky V.E., Tiptenko G.S. Using in-situ temperature measurements to estimate saturated soil thermal properties by solving a sequence of optimization problems // *Cryosphere*. – 2007. – № 1. – P. 41–58.
25. Шерстюков А.Б. Длительные тенденции и изменения температуры почвогрунтов последнего десятилетия в зоне многолетней мерзлоты России // *Труды ФГБУ ВНИИГМИ-МЦД*. – 2014. – Т. 178 – С. 224–232.
26. Павлов А.В. Тренды современных изменений температуры почвы на севере России // *Криосфера Земли*. – 2008. – Т. XII. – № 3. – С. 22–27.
27. *Гидрогеология СССР*. Т. XVI. Западно-Сибирская равнина (Тюменская, Омская, Новосибирская и Томская области) / под ред. А.В. Сидоренко. – М.: Недра, 1970. – 368 с.
28. Израэль Ю.А., Павлов А.В., Анохин Ю.А. Эволюция криолитозоны при современных изменениях глобального климата // *Метеорология и гидрология*. – 2002. – № 1. – С. 22–34.
29. Национальный атлас России. Экология и природа. Т. 2. URL: <http://национальныйатлас.рф> (дата обращения: 07.10.15).
30. Российский гидрометеорологический портал. URL: <http://meteo.ru/> (дата обращения: 01.10.15).
31. Официальный сайт ООО «Расписание Погоды». URL: <http://gp5.ru/> (дата обращения: 10.10.15).
32. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

33. Христофоров А.В. Надежность расчетов речного стока. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 168 с.
34. Rapp J., Schönwiese Ch.-D. Atlas der Niederschlags und Temperaturtrends in Deutschland 1891–1990 // Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten: Serie B Meteorologie und Geophysik. – Frankfurt am Main: Universität Frankfurt, 1996. – Bd. 5. – 255 s.
35. Климатология / О.А. Дроздов, В.А. Васильев, Н.В. Кобышева, Л.К. Смекалова, Е.П. Школьный. – Л.: Гидрометеоздат, 1989. – 568 с.
36. Varlamov S., Skachkov Yu., Skryabin P. Current climate change effects on the ground thermal regime in Central Yakutia // Sciences in cold and arid regions. – 2014. – V. 6. – № 4. – P. 282–292.
37. Льготин В.А., Савичев О.Г., Макушин Ю.В. Многолетние изменения среднесезонных и среднегодовых уровней и температуры подземных вод верхней гидродинамической зоны в Томской области // Геоэкология. – 2010. – № 1. – С. 23–29.
38. Distributions of bacterial and archaeal membrane lipids in surface sediments reflect differences in input and loss of terrestrial organic carbon along a cross-shelf Arctic transect / S.A. Doğrul, R.B. Sparkes, J. Bischoff, H.M. Talbot, T. Gustafsson et al. // Organic Geochemistry. – 2015. – V. 83–84. – P. 16–26.
39. Historical records of organic matter supply and degradation status in the East Siberian Sea / L. Bröder, T. Tesi, A. Andersson, T.I. Eglinton, I.P. Semiletov et al. // Organic Geochemistry. – 2016. – V. 91. – P. 16–30.
40. Vakulenko N.V., Nigmatullin R.I., Sonechkin D.M. On the Problem of the Global Climate Change // Meteorology and hydrology. – 2015. – V. 40. – № 9. – P. 629–634.

Поступила 22.12.2015 г.

Информация об авторах

Решетько М.В., кандидат географических наук, доцент кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Моисеева Ю.А., аспирант кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 551.583:551.345(571.1)

CLIMATIC FEATURES AND STATISTICAL EVALUATION OF CLIMATE CHANGE IN PERMAFROST REGIONS IN THE NORTH OF WESTERN SIBERIA

Margarita V. Reshetko¹,
MRechetko@tpu.ru

Yulia A. Moiseeva¹,
julchiky@mail.ru

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

The relevance of the research is related to the necessity to assess climate changes affecting the permafrost due to the possible growth of greenhouse gas emissions and increase of accident rate in industrial, oil and gas infrastructure at permafrost thawing.

The aim of the research is to estimate the current changes in climate characteristics, which affect directly the thermal state of soils in permafrost areas in the north of Western Siberia.

Methods. Analysis of long-term changes of meteorological data consisted of tests of null hypothesis of randomness and homogeneity of observation series and trend presence. The homogeneity test was carried out using the Abbe test, the test of randomness was carried out by Pitman criterion, the trend presence was checked using the criterion of inversions. The conclusion on nonrandom change or violation of the homogeneity of rows corresponded to the condition, when the modulus of the estimated statistics exceeded the corresponding critical value at significance level of 0,05.

Results. The paper considers the climatic features in the north of Western Siberia and its variability in recent years. The analysis of temperature changes of air and soil at depths of 160 and 320 cm, the amount of precipitation and snow cover based on the instrumental data for the last 35 years has shown that air temperature continues rising in the warmer months, soil temperature increases throughout the year. The authors have revealed zonal character of changes in the amount of precipitation and snow cover. Microclimatic changes in characteristic of meteorological values can distort the real picture of climate change.

Key words:

North of Western Siberia, permafrost, climate change, statistical analysis, soil temperature.

The research was financially supported by Tomsk Polytechnic University (project BNY_VAF_144_2014).

REFERENCES

- Mernild S.H., Malmros J.K., Yde J.C., De Villiers S., Knudsen N.T., Wilson R. Glacier changes in the circumpolar Arctic and sub-Arctic, mid-1980s to late-2000s/2011. *Geografisk Tidsskrift – Danish Journal of Geography*, 2015, vol. 115, no. 1, pp. 39–56.
- Carton J.A., Ding Y., Arrigo K.R. The seasonal cycle of the Arctic Ocean under climate change. *Geophysical Research Letters*, 2015, vol. 42, no. 18, – P. 7681–7686.
- Bulygina O.N., Arzhanova N.M., Groisman P.Ya. Icing conditions over Northern Eurasia in changing climate. *Environmental research letters*, 2015, vol. 10, no. 2, pp. 11.
- Bring A., Destouni G. Arctic Climate and Water Change: Model and Observation Relevance for Assessment and Adaptation. *Surveys in Geophysics*, 2014, vol. 35, Iss. 3, pp. 853–877.
- Zemtsov V.A., Paromov V.V., Kopysov S.G., Kouraev A.V., Negrul S.V. Hydrological risks in Western Siberia under the changing climate and anthropogenic influences conditions. *International Journal of Environmental Studies*, 2014, vol. 71, no. 5, pp. 611–617.
- Isaksen I.S.A., Berntsen T.K., Dalsøren S.B., Eleftheratos K., Orsolini Y., Rognerud B., Stordal F., Søvdø O.A., Zerefos C., Holmes C.D. Atmospheric Ozone and Methane in a Changing Climate. *Atmosphere*, 2014, vol. 5, pp. 518–535.
- Smyshlyaeva S.P., Mareev E.A., Galinc V.Ya., Blakitnaya P.A. Modeling the Influence of Methane Emissions from Arctic Gas Hydrates on Regional Variations in Composition of the Lower Atmosphere. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, vol. 51, no. 4, pp. 412–422.
- Semenov S.M. *Metody otsenki posledstviy izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem* [Methods for assessing the effects of climate change for physical and biological systems]. Ed. by S.M. Semenov. Moscow, Rosgidromet Publ., 2012. 511 p.
- Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G., Malkova G.V. Thermal state of permafrost in Russia. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2012, vol. 21, pp. 136–155.
- Mazhitova G.G., Kaverin D.A. Dinamika glubiny sezonnogo protaivaniya i osadki poverkhnosti pochvy na ploshchadke tsirkumpolyarnogo monitoringa deyatelnogo sloya (CALM) v evropeyskoy chastii Rossii [Thaw depth dynamics and soil surface subsidence at a circumpolar active layer monitoring (CALM) site, the European north of Russia]. *Cryosphere of the Earth's*, 2007, vol. XI, no. 4, pp. 20–30.
- Brown J., Hinkel K.M., Nelson F.E. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) Program: Research designs and initial results. *Polar Geography*, 2000, vol. 24, no. 3, pp. 165–258.
- Dzyuba A.V., Zektser I.S. Klimaticheskiy kriolitioeffekt: vliyaniye degradatsii kriolitozony na klimat [Climatic cryolite effect: the impact of degradation of the permafrost zone on the climate]. *Sciences about the Earth*, 2011, pp. 260–272. Available at: http://www.rfbr.ru/rffi/ru/popular_science_articles/o_1894459 (accessed 7 November 2015).
- Bykhovets S.S., Sorokovikov V.A., Martuganov R.A. Istoriya nablyudeniya za temperaturoy pochvy na seti meteorologicheskikh stantsiy Rossii [History of soil temperature measurements at the network of meteorological stations in Russia]. *Cryosphere of the Earth's*, 2007, vol. XI, no. 1, pp. 7–20.
- Pavlov A.V., Malkova G.V. Melkomasshtabnoe kartografirovaniye trendov sovremennykh izmeneniya temperatury gruntov na Severe

- Rossii, Novosibirsk [Small-scale mapping of trends of the contemporary ground temperature changes in the Russian north]. *Cryosphere of the Earth's*, 2009, vol. XIII, no. 4, pp. 32–39.
15. Bulygina O.N., Korshunova N.N., Razuvaev V.N. Izmeneniya kharakteristik snezhnogo pokrova na territorii Rossii v poslednie desyatiletiiya [Changes of snow cover in the last decade in Russia]. *Trudy FGBU VNIIGMI-MTsD* [Proc. FGBU RIHMI MCD]. Obninsk, 2007. Vol. 178, pp. 54–62.
 16. Groisman P.Ya., Blyakharchuk T.A., Chernokulsky A.V. Climate changes in Siberia. *Regional environmental changes in Siberia and their global consequences*. Ch. 3. Dordrecht, Springer, 2013. pp. 57–109.
 17. Izrael Yu.A., Anokhin Yu.A., Myach L.T., Sherstyukov A.B. Izmenenie klimata v rayonakh vechnoy merzloty na territorii Rossii [Climate change in permafrost regions in Russia]. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii. Teoriya i praktika otsenki sostoyaniya kriosfery Zemli i prognoz ee izmeneniy* [Proc. of the international conference. Theory and practice of assessing the state of the cryosphere and the Earth's forecast it changes]. Tyumen, 2006. Vol. I, pp. 72–75.
 18. Izrael Yu.A., Anokhin Yu.A., Myach L.T., Sherstyukov A.B. Otsenka vozmozhnykh ekologicheskikh i ekonomicheskikh posledstviy izmeneniya klimata v rayonakh vechnoy merzloty [Assessment of possible environmental and economic impacts of climate change in permafrost regions]. *Vserossiyskaya konferentsiya. Nauchnye aspekty ekologicheskikh problem Rossii* [Proc. Rus. Conf. The scientific aspects of environmental problems in Russia]. Moscow, 2006. pp. 19–20.
 19. Izrael Yu.A., Pavlov A.V., Anokhin Yu.A., Myach L.T., Sherstyukov A.B., Statistical assessment of the elements of climate change in permafrost regions in Russia. *Meteorology and Hydrology*, 2006, vol. 5, pp. 27–38. In Rus.
 20. Alfimov A.V., Berman D.I. Podsnenezhnye temperatury i pochvennaya biota v Severnoy Evrazii [Undersnow temperature and soil biota in the Northern Eurasia]. *Sciences about the Earth*, 2007, pp. 1–8. Available at: http://www.rfbr.ru/rffi/ru/popular_science_articles/o_16747 (accessed 7 November 2015).
 21. Pavlov A.V., Gravis G.F. Vechnaya merzlota i sovremenny klimat [Permafrost and the current climate]. *Sciences about the Earth*, 2000, pp. 1–9. Available at: http://www.rfbr.ru/rffi/ru/popular_science_articles/o_16473 (accessed 7 November 2015).
 22. Anisimov O.A., Reneva S.A. Permafrost and changing climate: the Russian perspective. *Ambio*, 2006, vol. 4, pp. 169–175.
 23. Sherstyukov A.B., Sherstyukov B.G. Spatial features and new trends in thermal conditions of soil and depth of its seasonal thawing in the permafrost zone. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2015, vol. 40, no. 2, pp. 73–78. In Rus.
 24. Nicolsky D.J., Romanovsky V.E., Tipenko G.S. Using in-situ temperature measurements to estimate saturated soil thermal properties by solving a sequence of optimization problems. *Cryosphere*, 2007, no. 1, pp. 41–58.
 25. Sherstyukov A.B. Dlitelnye tendentsii i izmeneniya temperatury pochvogruntov poslednego desyatiletiiya v zone mnogoletney merzloty Rossii [Long-term trends and changes in soil temperature of the last decade in the permafrost zone of Russia]. *Trudy FGBU VNIIGMI-MTsD*, [Proc. FGBU RIHMI MCD]. Obninsk, 2014. Vol. 178, pp. 224–232.
 26. Pavlov A.V. Trendy sovremennykh izmeneniy temperatury pochvy na severe Rossii [Trends of contemporary changes of soil temperature in northern Russia]. *Cryosphere of the Earth's*, 2008, vol. XII, no. 3, pp. 22–27.
 27. Gidrogeologiya SSSR. T. XVI. *Zapadno-Sibirskaya ravnina (Tyumenskaya, Omskaya, Novosibirskaya i Tomskaya oblasti)* [Hydrogeology of the USSR. T. XVI. West Siberian Plain (Tyumen, Omsk, Novosibirsk and Tomsk regions)]. Moscow, Nedra Publ., 1970. 368 p.
 28. Izrael Yu.A., Pavlov A.V., Anokhin Yu.A. Evolution of the permafrost zone in current global climate change. *Meteorology and Hydrology*, 2002, no. 1, pp. 22–34. In Rus.
 29. Natsionalny atlas Rossii, Ekologiya i priroda. T. 2 [The National Atlas of Russia. Vol. 2]. Available at: <http://национальныйатлас.рф> (accessed 7 October 2015).
 30. Rossiyskiy gidrometeorologicheskii portal [The Russian Hydrometeorological portal]. Available at: <http://meteo.ru/data> (accessed 1 October 2015).
 31. Ofitsialny sayt OOO «Raspisanie Pogody» [The official site of «Reliable Prognosis»]. Available at: <http://rp5.ru/> (accessed 10 October 2015).
 32. Bendat Dzh., Pirsol A. *Prikladnoy analiz sluchaynykh dannyykh* [Applied analysis of random data]. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1989. 540 p.
 33. Khristoforov A.V. *Nadezhnost raschetov rechnogo stoka* [The reliability of calculations of river flow]. Moscow, MGU Press, 1993. 168 p.
 34. Rapp J., Schönwiese Ch.-D. Atlas der Niederschlags und Temperaturtrends in Deutschland 1891–1990. *Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten: Serie B Meteorologie und Geophysik*. Frankfurt am Main: Universität Frankfurt, 1996. Bd. 5, 255 s.
 35. Drozdov O.A., Vasilyev V.A., Kobysheva N.V., Smekalova L.K., Shkolny E.P. *Klimatologiya* [Climatology]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989. 568 p.
 36. Varlamov S., Skachkov Yu., Skryabin P. Current climate change effects on the ground thermal regime in Central Yakutia. *Sciences in cold and arid regions*, 2014, vol. 6, no. 4, pp. 282–292.
 37. Lgotin V.A., Savichev O.G., Makushin Yu.V. Long-term changes in the average seasonal and annual mean levels and temperature of groundwater of upper hydrodynamic zone in Tomsk Region. *Geoekologiya*, 2010, no. 1, pp. 23–29. In Rus.
 38. Doğrul S.A., Sparkes R.B., Bischoff J., Talbot H.M., Gustafsson T. Distributions of bacterial and archaeal membrane lipids in surface sediments reflect differences in input and loss of terrestrial organic carbon along a cross-shelf Arctic transect. *Organic Geochemistry*, 2015, vol. 83–84, pp. 16–26.
 39. Bröder L., Tesi T., Andersson A., Eglinton T.I., Semiletov I.P. Historical records of organic matter supply and degradation status in the East Siberian Sea. *Organic Geochemistry*, 2016, vol. 91, pp. 16–30.
 40. Vakulenko N.V., Nigmatullin R.I., Sonechkin D.M. On the Problem of the Global Climate Change. *Meteorology and hydrology*, 2015, vol. 40, no. 9, pp. 629–634. In Rus.

Received: 22 December 2015.

Information about the authors

Margarita V. Reshetko, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Yulia A. Moiseeva, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 552.321.6:552.164

НЕОДНОРОДНОСТЬ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ОЛИВИНА В УЛЬТРАМАФИТАХ БАЙКАЛО-МУЙСКОГО ОФИОЛИТОВОГО ПОЯСА (СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ)

Чернышов Алексей Иванович¹,
aich@ggf.tsu.ru

Пугачёва Елена Егоровна²,
pugachevae@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

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

Актуальность работы. Постоянно устанавливаемые признаки пластического течения в ультрамафитах предопределили подход к их изучению, как к метаморфическим породам, с применением нетрадиционного метода петроструктурного анализа. Использование этого метода позволяет реконструировать хронологическую последовательность процессов формирования и пластического деформирования ультрамафитов на уровнях верхняя мантия – земная кора, выявить общую направленность структурно-вещественной эволюции и решить ряд актуальных проблем их минерогенеза.

Цель работы: по результатам выявленной микроструктурной неоднородности дунитов и гарцбургитов, типизации их микроструктур, оценки температур оливин-хромшпинелиевых равновесий и петроструктурного анализа оливина предложить сценарий структурной эволюции ультрамафитов Парамского и Шаманского массивов Байкало-Муйского офиолитового пояса на уровнях верхняя мантия – земная кора.

Методы исследования. Детальное петрографическое изучение ультрамафитов проводилось на поляризационном микроскопе AxioScope-40 фирмы Carl Zeiss, что позволило провести микроструктурную типизацию дунитов и гарцбургитов. Их типизация основана на морфологических особенностях оливина и была разработана многими исследователями. Количественная оценка деформационных микроструктур оливина в изученных ультрамафитах проводилась с использованием метода стереометрической металлографии. Микроструктурный анализ оливина является неотъемлемой частью петроструктурного изучения ультрамафитов. Он позволяет установить предпочтительные ориентировки минералов по внутреннему строению, которые, в свою очередь, являются отражением термодинамических условий их пластических деформаций. Вещественный состав оливинов и хромшпинелидов установлен на основании микрорентгеноспектральных определений, выполненных в Институте нефтегазовой геологии и геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск) на микроанализаторе «Camebax». Расчет температурных равновесий проводился с использованием оливин-хромшпинелиевого геотермометра Фабри по вещественному составу сосуществующих оливина и хромшпинелида.

Результаты. Для дунитов и гарцбургитов Парамского и Шаманского массивов Байкало-Муйского офиолитового пояса на оригинальном материале проведена идентификация деформационных микроструктур оливина. Они объединены в шесть типов: протогранулярный, мезогранулярный, порфирукластовый, порфиroleйстовый, мозаичный (мозаично-лейстовый) и мозаично-паркетовидный. Пространственное распределение выделенных микроструктур в изученных массивах от центра к периферии характеризуется тенденцией уменьшения размера зерен в породах, показывает возрастание степени их пластического деформирования и отражает динамометаморфическую зональность. Петроструктурный анализ оливина в выделенных микроструктурных типах позволил установить термодинамические условия их реализации. Они фиксируют регрессивную направленность метаморфических преобразований ультрамафитов высокотемпературными пластическими деформациями, синтетектонической рекристаллизацией и вторичной рекристаллизацией отжига в процессе формирования, перемещения и консолидации ультрамафитов в верхней мантии и земной коре. Установленная эволюция микроструктур оливина отражает рубежи многократно наложенных пластических деформаций, которые при благоприятных условиях могут быть определяющими в локализации хромита, хризотил-асбеста, нефрита, жадеита среди ультрамафитов из офиолитовых комплексов.

Ключевые слова:

Офиолиты, ультрамафиты, пластические деформации, дуниты, гарцбургиты, оливин, петроструктурные узоры, хромшпинелид, геотермометр, температурные режимы.

Объектом исследования являются ультрамафиты Парамского и Шаманского массивов, которые представляют фрагменты Байкало-Муйского офиолитового пояса [1], расположенного в северо-восточном Прибайкалье (рис. 1).

Рис. 1. Географическое расположение Парамского и Шаманского ультрамафитовых массивов Байкало-Муйского офиолитового пояса. Массивы: 1 – Парамский, 2 – Шаманский

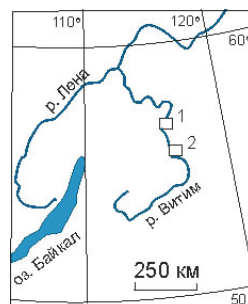


Fig. 1. Geographical location of the Paramsky and Shamansky ultramafic massifs of Baikal-Muya ophiolite belt. Massifs: 1 is Paramsky, 2 is Shamansky

Неоднородность пластического деформирования ультрамафитов

Дуниты и гарцбургиты в обоих массивах пластически деформированы, что является непрямым атрибутом метаморфических перидотитов из офиолитовых комплексов [2–5]. Степень пластического деформирования пород проявлена неоднозначно, что находит отражение в их микроструктурных особенностях. Типизация микроструктур проводилась по морфологическим признакам оливина, согласно

классификации, предложенной французскими петрологами [6]. Микроструктуры оливина объединяются в шесть типов: протогранулярный, мезогранулярный, порфирокластовый, порфиroleйстовый, мозаичный (мозаично-лейстовый) и мозаично-паркетовидный (рис. 2), последовательность которых отражает возрастание степени пластического деформирования дунитов и гарцбургитов.

Пространственное распределение выделенных микроструктур в изученных массивах от центра к

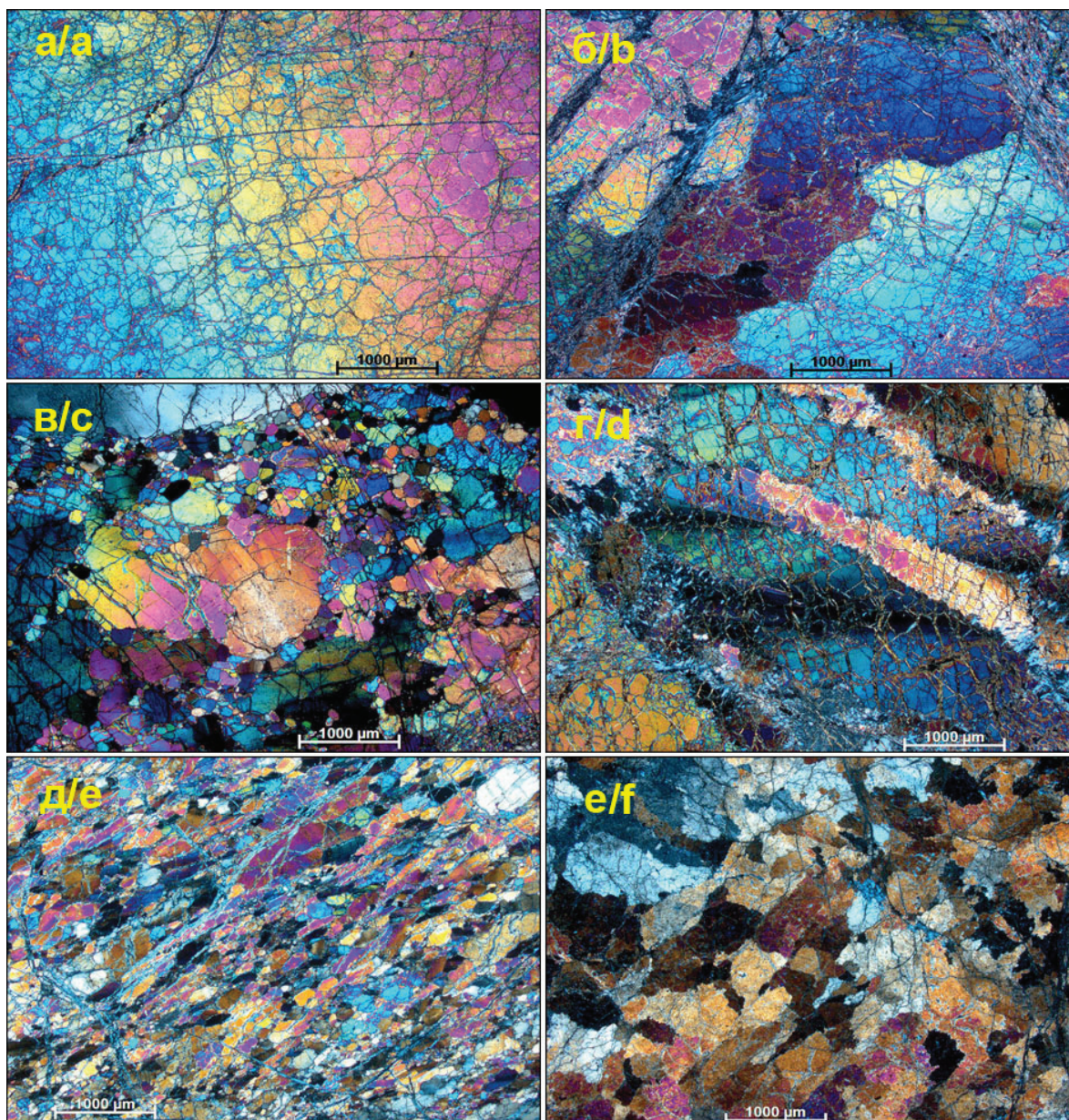


Рис. 2. Микроструктуры пластически деформированных дунитов: а) протогранулярная (обр. Па-26/5); б) мезогранулярная (обр. Па-12/4); в) порфирокластовая (обр. Ш-61/1); г) порфиroleйстовая (обр. Па-31/6); д) мозаично-лейстовая (обр. Па-59/2); е) мозаично-паркетовидная (обр. Па-22/3). Фото с анализатором

Fig. 2. Microstructures of plastically deformed dunites: а) protogranular (sample Pa-26/5); б) mesogranular (sample Pa-12/4); в) porphyroclastic (sample Sh-61/1); д) porphyroclath (sample Pa-31/6); е) mosaic-lath (sample Pa-59/2); ф) mosaic-parquet-like (sample Pa-22/3). The pictures are with the analyzer

периферии характеризуется тенденцией уменьшения размера зерен в породах и отражает динамометаморфическую зональность [3, 7].

Протогранулярный тип микроструктуры оливина пользуется незначительным распространением и устанавливается в центральных частях массивов. В этом типе оливин имеет максимальные размеры зерен (от 4–10 до 25 мм) (рис. 2, а). Их форма субизометричная либо слабоудлиненная с округлыми плавными границами, часто сходящимися под углом 120°, что является показателем равновесности этой структуры и ее формирования в твердом субстрате [8]. Протогранулярный оливин отличается незначительной степенью пластических деформаций, которая фиксируется развитием единичных полос излома, возникающих при трансляционном скольжении по системе {0kl}[100], выявленной микроструктурным анализом на Федоровском століке [7]. При этом в соседних ламелях отмечаются минимальные углы (α) между одноименными кристаллооптическими осями. Зерна оливина обычно имеют однородное либо слабоволнистое погасание; обладают минимальной удельной поверхностью; для них характерно отсутствие предпочтительной ориентировки по форме (табл. 1). Такой практически изотропный узор рассматривается как следствие возникновения неориентированной системы, при формировании которой зёрна пространственно равноосны [9].

Мезогранулярный тип микроструктуры имеет значительное распространение среди ультрамафитов изученных массивов. Он возникает на месте пород с протогранулярным типом микроструктуры и образует с ним постепенные переходы. Дуниты и гарцбургиты с мезогранулярным типом имеют гранобластовую микроструктуру (рис. 2, б), возникающую в результате распада крупных неправильных протогранулярных зерен оливина на равновес-

ные индивиды, что находит отражение в увеличении удельной поверхности их зерен (табл. 1). Зерна оливина имеют субизометричную и слабоудлиненную форму, размер в среднем составляет 4–5 мм. Для них отмечается очень слабая степень проявления линейной ориентации. Границы зерен обычно плавно изогнутые либо прямолинейны и часто образуют тройные точки сочленения. Пластические деформации оливина проявляются в наличии полисинтетических полос пластического излома, обусловленных трансляционным скольжением по {0kl}[100], реже по (110)[001] с минимальными углами поворота (α до 12°) [7]. Погасание оливина обычно однородное либо слабоволнистое.

Порфирокластовый тип микроструктуры оливина ультрамафитов пользуется наибольшим распространением. Формирование этой микроструктуры связано с интенсивной синтетектонической рекристаллизацией зёрен прото- и мезогранулярного типов. В результате крупные пластически деформированные порфирокласты оказываются среди мелкозернистого агрегата (рис. 2, в). Возрастная степень пластической деформации пород находит отражение в увеличении удельной поверхности зерен оливина (табл. 1). Порфирокласты оливина с неровными, зазубренными границами имеют субизометричную, чаще удлиненную, линзовидную форму и отличаются заметной степенью линейной ориентации. Размер порфирокласт составляет по длине от 1,5 до 5–7 мм. Порфирокласты оливина обычно интенсивно пластически деформированы, для них характерно отчетливо выраженное неоднородное волнистое погасание и многочисленные полосы излома по системам {0kl}[100] и (110)[001] [7]. Величина угла (α) между одноименными осями в соседних ламелях варьирует весьма существенно (до 20°), по сравнению с этим параметром в прото- и мезогранулярном типах, что свидетель-

Таблица 1. Удельная протяженность границ зёрен оливина (ΣS) и степень их ориентации (α ор. %) в пластически деформированных ультрамафитах

Table 1. Specific length of the olivine grain boundaries (ΣS) and their orientation (α or., %) in the plastically deformed ultramafic rocks

| № обр. Sample No | Тип микроструктуры Type of microstructure | ΣS см/см ² ΣS cm/cm ² | $\Sigma S_{из}$ см/см ² ΣS_{iz} cm/cm ² | $\Sigma S_{ор}$ см/см ² ΣS_{or} cm/cm ² | α ор., % α or., % |
|---------------------|--|--|--|--|------------------------------------|
| Па-26/5 | Протогранулярный/Protogranular | 12,8 | – | – | – |
| Ш-23/1 | – " – | 14,0 | – | – | – |
| Па-12/4 | Мезогранулярный/Mesogranular | 27,5 | 25,9 | 1,6 | 5,7 |
| Ш-46/5 | – " – | 21,6 | 19,6 | 2,0 | 9,3 |
| Па-26/9 | Порфирокластовый/Porphyroclastic | 38,3 | 26,1 | 12,2 | 33,7 |
| Ш-64/1 | – " – | 29,4 | 16,1 | 13,3 | 45,2 |
| Па-31/6 | Порфиroleйстовый/Porphyrolath | 51,9 | 20,4 | 31,5 | 60,7 |
| Ш-43/1 | – " – | 41,2 | 18,3 | 22,9 | 55,6 |
| Па-2/2 | Мозаичный/Mosaic | 82,3 | 50,1 | 32,2 | 33,1 |
| Па-59/2 | Мозаично-лейстовый/Mosaic-lath | 161,1 | 54,0 | 107,1 | 66,5 |
| Па-22/3 | Мозаично-паркетовидный/Mosaic-parquet-like | 128,1 | 76,4 | 51,7 | 40,4 |

Примечание. Удельная протяженность границ зерен оливина: ΣS – общая, $\Sigma S_{из}$ – изометричных зерен, $\Sigma S_{ор}$ – линейно ориентированных зерен.

Note. Specific length of the olivine grain boundaries: ΣS – total, ΣS_{iz} – of isometric grains, ΣS_{or} – of linear oriented grains.

стует об условиях неоднородного трансляционно-скольжения при меньших температурах его реализации [10].

Мозаичный агрегат зерен оливина формируется при синтетектонической рекристаллизации по границам крупных индивидов. При этом мозаичные агрегаты часто формируют субпараллельные полосы, ориентированные согласно удлинению порфирокласт. Мелкие рекристаллизованные зерна (необласты) развиваются по границам полос излома. Зерновые границы необласт и границ полос излома сходятся в тройных точках, что является результатом миграции зерновых границ в процессе синтетектонической рекристаллизации, при которой система стремится к термодинамическому равновесию с минимальной межзерновой энергией [11]. Размер рекристаллизованных зерен оливина примерно 0,5 мм; форма обычно субизометричная. Они также постоянно обнаруживают признаки пластической деформации в виде неоднородного волнистого погасания и полос излома по $\{0kl\}[100]$, развивающихся под острым углом (до 20°) к их удлинению.

Порфиroleйстовый тип микроструктуры оливина приурочен к зонам интенсивного пластического течения ультрамафитов. Этот тип микроструктуры обнаруживает сходство с порфирокластовым, от которого отличается более высокой удельной поверхностью зерен оливина и большей степенью ориентации его удлиненных индивидов (рис. 2, з; табл. 1).

Порфирокласты оливина представлены ленточными, удлиненными индивидами, имеющими строгую предпочтительную ориентировку по форме. Их размер по длинной оси составляет 1,5–3,5 мм при ширине 0,5–1,5 мм, отношение длины к ширине – 3/1–5/1 и более. Границы порфирокласт прямолинейные либо с неровными зубренными краями. Многочисленные полосы излома по $\{0kl\}[100]$ обычно ориентируются под углом примерно 45° – 60° к удлинению зерен и часто обнаруживают симметричное, перистое расположение в смежных индивидах по отношению к их удлинению, имеют полисинтетический характер, при этом ширина ламелей составляет 0,1–0,3 мм. Формирование полос излома трансляционным скольжением сопровождается значительными углами поворота вокруг оси вращения (α до 20° и более) с последующим расчленением зерен вдоль границ излома на отдельные индивиды.

Порфирокласты пластически деформированного оливина по краям синтетектонически рекристаллизованы с образованием мелкозернистого агрегата. Рекристаллизованные индивиды имеют эллипсоидальную, удлиненную форму (размером по длине до 1 мм при ширине примерно 0,3 мм) и ориентируются согласно с направлением удлинения крупных порфирокласт; нередко обтекают их с образованием структур будинажа. Оливин в мелкозернистом агрегате сохраняет следы интенсив-

ных пластических деформаций с проявлением неоднородного погасания и полос излома.

Мозаичный тип микроструктуры устанавливается в ультрамафитах из эндоконтактных частей массивов и является результатом дальнейшего прогрессивного разрушения мезогранулярной и порфирокластовой микроструктур в результате синтетектонической рекристаллизации. Этот тип микроструктуры отличается присутствием мелкозернистого мозаичного агрегата субизометричных и слабоудлиненных зерен оливина (размером около 0,5 мм), в котором устанавливается предпочтительная ориентировка крупных удлиненных индивидов, что отражается в значительной удельной поверхности зерен оливина и существенной степени их ориентации (табл. 1). В оливине постоянно обнаруживается неоднородное погасание и реже полосы излома по системам $\{0kl\}[100]$ и $(110)[001]$.

Разновидностью мозаичного типа является *мозаично-лейстовый*, который отражает максимальную степень пластической деформации ультрамафитов. Этот тип микроструктуры тесно ассоциирует с порфиroleйстовым и приурочен к центральным частям линейных зон интенсивных сдвиговых перемещений. Мозаично-лейстовый тип отличается наличием равномернозернистого агрегата оливина с прямолинейными границами зерен, линзовидной либо лейстовой, ленточной формы (рис. 2, д), со строгой предпочтительной линейной ориентировкой, что отражается в максимальной удельной поверхности и наиболее высокой степени ориентации (табл. 1). Размер зерен по длине составляет до 1 мм, что в 2–3 раза больше их ширины. В оливине постоянно отмечаются волнистое погасание и полосы излома по системе $\{0kl\}[100]$, часто ориентированные симметрично к границам смежных индивидов.

Мозаично-паркетовидный тип микроструктуры оливина пользуется локальным распространением в ультрамафитах Пармского массива и, очевидно, связан с термальным воздействием на ультрамафиты более поздних интрузий габбро. Этот тип микроструктуры встречается локально в ультрамафитах Парамского массива. Формирование паркетовидного типа оливина, очевидно, обусловлено вторичной рекристаллизацией отжига, в результате которого, под влиянием внутренних напряжений, происходит распад пластически деформированных палеобластов оливина на мелкие ненапряженные индивиды и субзерна (необласты), которые имеют субизометричную, слабоудлиненную, призматическую либо неправильную форму (рис. 2, е). Часто наблюдаются постепенные переходы между отдельными индивидами с сохранением контуров исходных протозерен. В мозаичном агрегате отмечается предпочтительная ориентировка удлиненных индивидов оливина. Для оливина этого типа устанавливается значительная удельная поверхность зерен и высокая степень ориентации их границ (табл. 1). Характерной особенностью мелких индивидов паркетовидного оливина является однородное погасание.

Оценка температур оливин-хромшпинелиевых равновесий

Имеющиеся данные по химическому составу сосуществующей пары оливин-хромшпинелид позволяют определять температуры установившихся твердофазовых равновесий в пластически деформированных дунитах и гарцбургитах Парамского и Шаманского массивов. Для этих целей нами был использован геотермометр Фабри [12]. Его преимущество состоит в том, что он фиксирует термальные уровни динамического равновесия, связанного с деформацией и перекристаллизацией пород. Экспериментально установлено, что оливин-хромшпинелиевый термометр фиксирует не температуру образования парагенезиса, а температуру прекращения реакции обмена [13].

Расчет температурных равновесий оливин-хромшпинелиевых парагенезисов в пластически деформированных дунитах и гарцбургитах исследуемых массивов выявил значительные диапазоны их колебаний: от 498 до 868 °С (табл. 2).

Таблица 2. Температуры оливин-хромшпинелиевых равновесий в пластически деформированных ультрамафитах

Table 2. Temperatures of the olivine-chromspinelide equilibria in the plasticity deformed ultramafic rocks

| Образец/Sample | M | R | S | Kd | T, °C |
|----------------|---|---|---|--------------|---------|
| Па-26/5 | 1 | 1 | 1 | 10,29–16,71 | 748–863 |
| Па-13/2 | 1 | 1 | 2 | 7,18–15,44 | 626–863 |
| Па-26/9 | 1 | 1 | 3 | 6,70–6,77 | 707–711 |
| Па-31/6 | 1 | 1 | 4 | 8,48–10,73 | 817–855 |
| Па-59/2 | 1 | 1 | 5 | 33,25–36,58 | 697–715 |
| Па-22/3 | 1 | 1 | 6 | 74,10–91,98 | 498–583 |
| Па-31/9 | 1 | 2 | 1 | 12,11–21,06 | 686–805 |
| Па-51/7 | 1 | 2 | 2 | 10,39–16,09 | 726–829 |
| Па-1/9 | 1 | 2 | 3 | 7,96–8,00 | 838–839 |
| Па-55/2 | 1 | 2 | 4 | 5,98–6,33 | 801–868 |
| Па-59/3 | 1 | 2 | 6 | 98,28–109,00 | 548–571 |
| Ш-26/1 | 2 | 1 | 2 | 25,16–37,36 | 612–619 |
| Ш-2/2 | 2 | 1 | 3 | 23,03–29,94 | 668–669 |
| Ш-6/1 | 2 | 1 | 4 | 13,16–44,41 | 608–754 |
| Ш-41/5 | 2 | 1 | 5 | 30,26–32,95 | 635–647 |
| Ш-23/1 | 2 | 2 | 1 | 13,49–82,17 | 571–698 |
| Ш-33/6 | 2 | 2 | 3 | 36,93–103,00 | 540–636 |
| Ш-1/1 | 2 | 2 | 4 | 14,63–94,38 | 567–731 |

Примечание. Массивы (M): 1 – Парамский (Па), 2 – Шаманский (Ш). Породы (R): 1 – дуниты, 2 – гарцбургиты. Микроструктуры оливина (S): 1 – протогранулярная, 2 – мезогранулярная, 3 – порфирикластовая, 4 – порфиroleйстовая, 5 – мозаично-лейстовая, 6 – мозаично-паркетовидная. Kd – коэффициенты распределения компонентов между сосуществующими оливинами и хромшпинелидами. T, °C – температуры равновесия, по Фабри [12].

Note. Massifs (M): 1 – Paramsky (Pa), 2 – Shamansky (Sh). Rocks (R): 1 – dunites, 2 – harzburgites. Microstructures of olivine (S): 1 – protogranular, 2 – mesogranular, 3 – porphyroclastic, 4 – porphyroblast-like, 5 – mosaic-lath, 6 – mosaic-parquet-like. Kd – coefficients of component distribution between the coexisting olivines and chromspinelides. T, °C – equilibrium temperatures, by Fabries [12].

Температурные вариации оливин-хромшпинелиевых равновесий наиболее отчетливо коррелируются со степенью деформации пород Парамского массива (рис. 3, а). Условно можно выделить три разных температурных режима пластических деформаций.

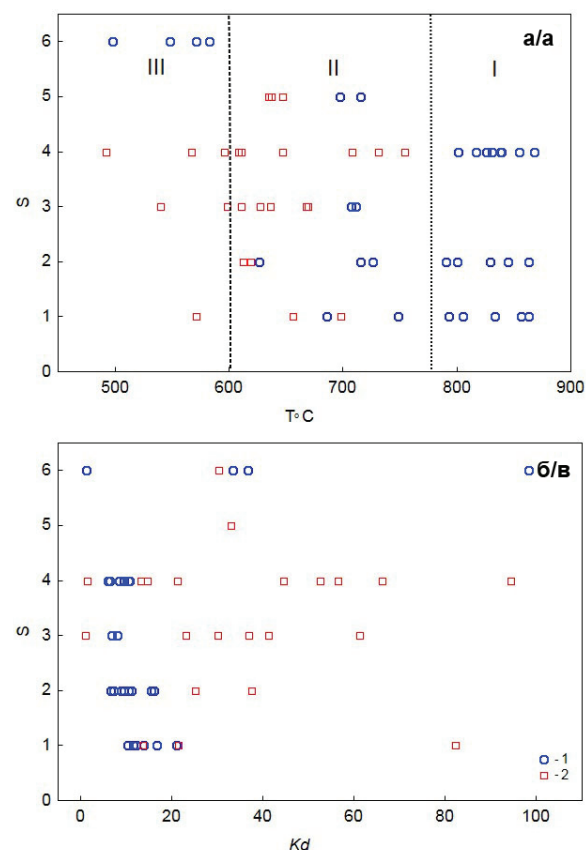


Рис. 3. Зависимость температур оливин-хромшпинелиевых равновесий (T, °C) (а) и коэффициентов распределения (Kd) (б) между сосуществующими оливинами и хромшпинелидами от степени деформации (S) в дунитах и гарцбургитах. I–III – режимы пластических деформаций: I – высоко-, II – средне-, III – низкотемпературные. Массивы: 1 – Парамский, 2 – Шаманский

Fig. 3. Dependence of olivine-chromspinelide balance temperatures (T, °C) (a) and distribution coefficients (Kd) (b) between the coexisting olivines and chromspinelides on the deformation degree (S) in dunites and harzburgites. I–III are the modes of plastic deformation: I is high-, II is middle-, III is low temperature. Massifs: 1 – Paramsky, 2 – Shamansky

Первый (I), наиболее высокотемпературный режим (более 780 °C), выявлен для дунитов и гарцбургитов с прото-, мезогранулярной и порфиroleйстовой микроструктурами, претерпевшими пластические деформации главным образом высокотемпературным трансляционным скольжением.

Второй (II), среднетемпературный режим (600–780 °C), является наиболее характерным для дунитов и гарцбургитов с разнообразными типами микроструктур, пластические деформации в кото-

рых осуществлялись как трансляционным скольжением, так и синтетектонической рекристаллизацией. Значительные вариации температур для таких дунитов и гарцбургитов, очевидно, отражают последовательность и незаконченность прекращения реакций обмена между оливинами и хромшпинелидами, обусловленных наложенными регрессивными пластическими деформациями.

Третий (III), низкотемпературный режим (500–600 °C), связан с термальным воздействием на ультрамафиты Парамского массива более поздних интрузий габбро, что фиксируется вторичной рекристаллизацией отжига и образованием мозаично-паркетовидной микроструктуры оливина.

Из анализа величин коэффициента распределения магния и железа (Kd) в сосуществующих оли-

винах и хромшпинелидах (табл. 2, рис. 3, б) следует, что для дунитов Парамского массива, претерпевших наиболее высокотемпературные пластические деформации, величина Kd является минимальной и увеличивается в интенсивно деформированных породах с мозаично-лейстовой микроструктурой. Минимальные вариации этой величины в пределах одного микроструктурного типа оливина в ультрамафитах указывают на то, что метаморфические реакции между оливинами и сосуществующими хромшпинелидами преимущественно были завершены. Однако в дунитах и гарцбургитах Шаманского массива с различными типами микроструктур, а также ультрамафитах с мозаично-паркетовидной микроструктурой, претерпевших рекристаллизацию отжига, величина

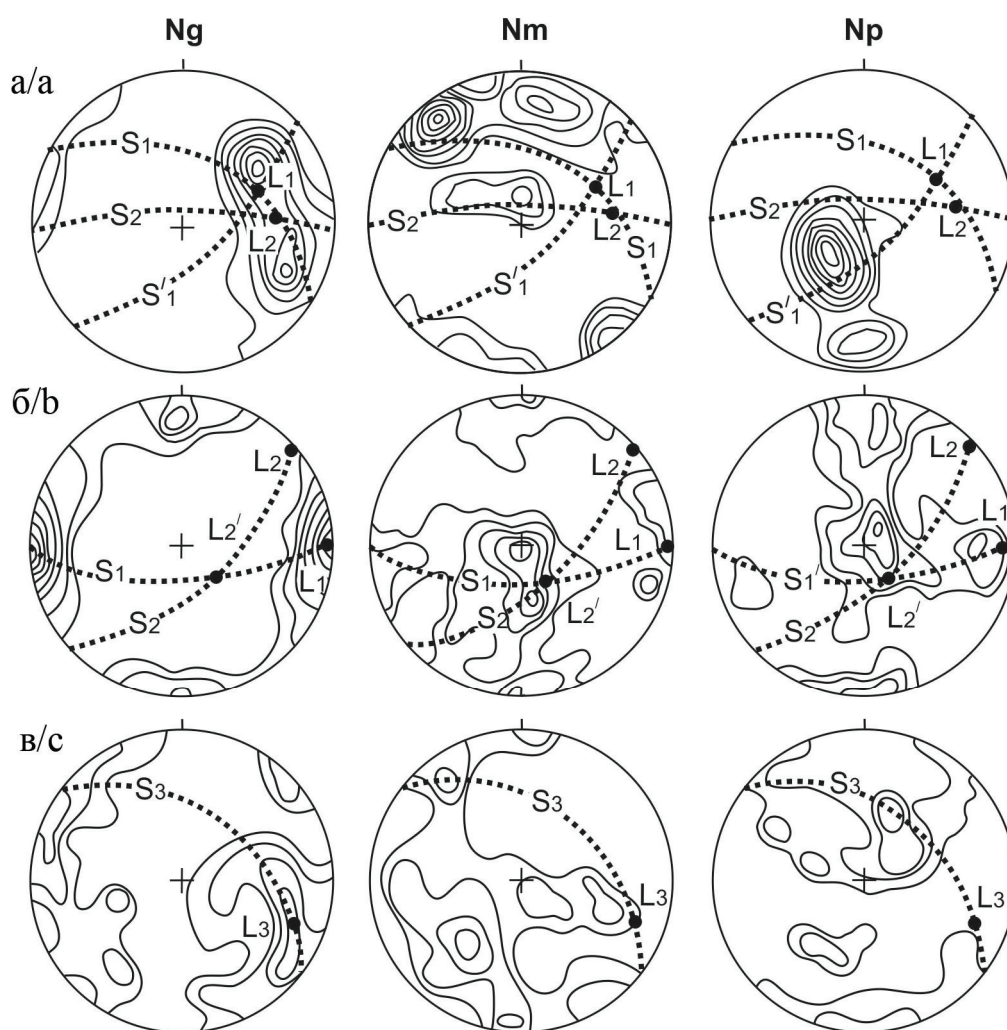


Рис. 4. Петроструктурные узоры оливина в дунитах. Деформационные типы микроструктур оливина: а) протогранулярный (обр. Па-55/4); б) порфиролейстовый (обр. Па-31/6); в) мозаичный (обр. Ш-41/5). Диаграммы построены по 100 замерам осей оптической индикатрисы. Изолинии 1–2–4–6–8–10–12–14 % на 1 % сетки Шмидта. Проекция на верхнюю полусферу. Точечные линии – плоскости минеральной уплощенности (S) с линейностью (L)

Fig. 4. Petrofabrics of olivine in dunitites. Deformation types of olivine microstructures: a) protogranular (sample Pa-55/4); b) porphyroblast (sample Pa-31/6); c) mosaic (sample Sh-41/5). The diagrams are based on 100 measurements of optical indicatrix and they are oriented by cardinal points. The projections are on the upper hemisphere; the contour lines 1–2–4–6–8–10–12–14 % are on 1 % of the Schmidt net area; the dotted lines are the planes of mineral flattening (S) with linearity (L)

Kd значительно варьирует и не обнаруживает какой-либо связи со степенью деформации, что, наиболее вероятно, является отражением неравномерности и незавершенности метаморфических реакций между оливинами и хромшпинелидами на уровне среднетемпературного режима пластических деформаций.

Петроструктурный анализ

Ранее установленные петроструктурные узоры оптических ориентировок оливина в дунитах Парамского и Шаманского массивов (рис. 4) позволили установить термодинамические условия пластического деформирования ультрамафитов на уровнях верхней мантии и земной коры [3]. Динамокинематическая интерпретация петроструктурных узоров в выделенных микроструктурных типах пластически деформированных дунитов и гарцбургитах проводилась с использованием данных зарубежных исследователей по экспериментально и природно-деформированным породам и минералам [12, 14–18].

Протогранулярный тип. Петроструктурный узор оливина (рис. 3, а) отражает два этапа пластической деформации дунитов. На первом, мантийном этапе, пластическое деформирование оливина осуществлялось механизмом трансляционного скольжения по наиболее высокотемпературной системе (010)[100], которое, очевидно, происходило при осевой деформации в режиме низкой скорости и высокой температуры. При этом оси Np ориентируются преимущественно вдоль направления сжатия (σ_3), а оси Ng – согласно оси растяжения $\sigma_1 \parallel L_1$ [14]. По экспериментальным данным, наиболее высокотемпературное трансляционное скольжение реализуется при температурах свыше 1000 °C, низком стрессе (10–20 МПа) и медленной скорости ($\epsilon < 10^{-8} \text{ c}^{-1}$) [18]. При высоких температурах ультрамафиты подвергаются первичной статической рекристаллизации отжига [8, 10], способствующей образованию свободных от напряжений крупных зерен протогранулярного оливина.

Второй этап связан с перемещением ультрамафитов в верхние части земной коры. Он сопровождался сдвиговыми пластическими деформациями в условиях понижения температуры (ниже 1000 °C), возрастания напряжений (до 120 МПа) и увеличения скорости ($\epsilon > 10^{-5} \text{ c}^{-1}$) [18]. В результате образовалась новая система уплощенности зерен оливина S_2 и линейность L_2 , которая способствовала усложнению петроструктурного узора оливина. На начальной стадии сдвига происходила активизация системы скольжения в зернах оливина, наследуемой от предыдущего этапа, которая способствовала усилению плотности концентрации исходного Ng-максимума. Последующее возрастание скорости сдвига способствовало активизации новой дополнительной системы скольжения, в результате чего образовался узор с двумя максимумами Ng, симметричными к S_2 и L_2 . На этом этапе

пластическая деформация оливина реализовалась трансляционным скольжением по системе (001)[100] при подчиненной роли синтетектонической рекристаллизации, с образованием локального максимума Np, субнормального к S_2 .

Порфиroleйстовый тип. Оливин имеет сложный узор оптической ориентировки (рис. 3, б), предполагающий два этапа пластической деформации дунитов. На раннем этапе сформировался узор с Ng-максимумом в плоскости минеральной уплощенности S_1 , совмещенным с L_1 . Перпендикулярно к L_1 отмечаются совмещенные пояса осей Nm и Np. Отмечается локальный максимум Np, нормальный к S_1 . Такая ориентировка оливина связана с пластическим деформированием в условиях осевого сжатия, которое реализовалось механизмом трансляционного скольжения по системам (010)[100], {0kl}[100]. Этот этап отвечает формированию протогранулярного оливина.

Последующий этап пластического деформирования дунитов обусловлен сдвиговыми деформациями в плоскости S_1 , что способствовало образованию переориентированной минеральной уплощенности S_2 и L_2 , а также растягиванию Ng-максимума в горизонтальный пояс с двумя сопряженными максимумами, симметричными по отношению к S_2 и L_2 . С возрастанием деформации горизонтальная линейность L_2 частично переориентируется в субвертикальное положение (L_2), совмещенное с Nm-максимумом и с осью внешнего вращения (σ_2). Такой петроструктурный узор с двумя сопряженными максимумами Ng связан с возникновением двух множеств зерен оливина с плоскостями трансляционного скольжения {0kl}[100]. При этом наиболее благоприятно ориентированными являются зёрна с плоскостью скольжения, близкой к плоскости сдвига. Другие индивиды с плоскостью скольжения, нормальной к плоскости сдвига, оказываются неблагоприятно ориентированными, и с возрастанием деформации их доля уменьшается. Одновременно с увеличением степени деформации увеличивается роль синтетектонической рекристаллизации. Наличие многочисленных полос излома в зёрнах оливина указывает на дискретность внутрикристаллического трансляционного скольжения, которое протекало в условиях снижения температур ($T \sim 1000\text{--}750 \text{ }^\circ\text{C}$), значительных напряжений (100–120 МПа) и высоких скоростей ($\epsilon > 10^{-5} \text{ c}^{-1}$) [18] в процессе перемещения ультрамафитов в земной коре по глубинным надвигам.

Мозаичный тип. Оптическая ориентировка мозаичного оливина имеет предпочтительную ориентировку (рис. 3, в), при которой наблюдаются максимумы осей Ng, Nm и Np, расположенные ортогонально. Максимум Ng совмещен с L_3 , а максимум Nm ориентирован субнормально к S_3 . Максимумы Ng и Nm растягиваются в совмещенные пояса, субнормальные к максимуму Np. Отмечается концентрация осей Np, ориентированных субнормально к S_3 . Такая оптическая ориентировка мозаичного

оливина, вероятно, образовалась трансляционным скольжением по системе (001)[100] и синтетонической рекристаллизацией. Подобные петроструктурные узоры оливина пользуются заметным распространением в синтетонически рекристаллизованных дунитах и установлены экспериментально [19, 20].

Выводы

Таким образом, ультрамафиты офиолитовых комплексов в процессе мантийно-коровой эволюции претерпели значительные структурно-вещественные преобразования, которые обусловлены главным образом высокотемпературными пластическими деформациями. По составу сосуществующих минералов ультрамафиты изученных массивов относятся к предельно деплетированным ультрамафитам гарцбургитового подтипа. Метаморфические дуниты и гарцбургиты характеризуются значительным разнообразием деформационных микроструктур оливина, которые отражают последовательность их пластических деформаций и объединяются в шесть типов: протогранулярный, мезогранулярный, порфинокластовый, порфиroleйстовый, мозаичный (мозаично-лейстовый) и мозаично-паркетовидный.

Согласно нашим исследованиям и с учетом экспериментальных данных, петроструктуры оливина в протогранулярном и мезогранулярном типах сформировались трансляционным скольжением и статической рекристаллизацией отжига при $T > 1000$ °C и более, $\sigma = 10\text{--}20$ МПа, $\dot{\epsilon} < 10^{-8}$ с⁻¹ в условиях соосных деформаций на значительных глубинах в верхней мантии [3]. Петроструктуры других

типов оливина образовались трансляционным скольжением и при активной роли синтетонической рекристаллизации в условиях несоосных деформаций в широком интервале температур при возрастающей роли стресса и значительной скорости ($T < 1000$ °C, $\sigma > 100\text{--}120$ МПа, $\dot{\epsilon} > 10^{-5}$ с⁻¹). Они отражают перемещение и консолидацию ультрамафитов в земной коре. Паркетовидный тип микроструктуры обусловлен термальным воздействием на ультрамафиты в эндоконтактных частях массивов более поздних интрузий габбро, что нашло отражение в микроструктуре вторичного отжига.

В процессе пластических деформаций пород происходит изменение химического состава породообразующих минералов, обусловленное активным обменом петрогенными элементами между сосуществующими минералами, главным образом оливином и хромшпинелидом. Выявленные температурные равновесия отражают регрессивную направленность метаморфических преобразований оливина и хромшпинелида, которые обусловлены сменой высокотемпературных пластических деформаций среднетемпературными с возрастанием роли синтетонической рекристаллизации. При этом взаимные реакции между оливином и хромшпинелидом часто оказываются незавершенными, что находит отражение в значительных интервалах температурных равновесий между сосуществующими минералами. В дальнейшем в условиях консолидации в земной коре ультрамафиты под влиянием габброидных интрузий подвергались относительно низкотемпературным процессам вторичного отжига.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордиенко И.В., Булгатов А.Н., Орсов Д.А. Геодинамические обстановки и металлогения Саяно-Байкальской горной области // Отечественная геология. – 2013. – № 3. – С. 7–15.
2. Савельева Г.Н., Суслон П.В. Структура и состав мантийных перидотитов на границе с коровыми комплексами офиолитов в массиве Сым-Кеу, Полярный Урал // Геотектоника. – 2014. – Т. 48. – № 5. – С. 347–358.
3. Чернышов А.И. Петроструктурная эволюция оливинов в ультрамафитах Парамского и Шаманского массивов (Байкало-Муйский офиолитовый пояс) // Геология и геофизика. – 2005. – Т. 46. – № 11. – С. 121–132.
4. Чернышов А.И., Юричев А.Н. Петроструктурная эволюция ультрамафитов Калнинского хромитоносного массива в Западном Саяне // Геотектоника. – 2013. – № 4. – С. 31–46.
5. Recrystallization Features in Olivine from Dunites of the Tar-lashkinsk Ultramafic Massif: new data from the EBSD analysis of rock-forming grains / A.S. Kulkov, A.I. Chernishov, D.V. Lyshagin, P.A. Tishin // Advanced Materials Research. – 2015. – V. 1085. – P. 319–323.
6. Mercier J.C., Nicolas A. Textures, structures and fabrics of upper mantle peridotites, as illustrated by xenoliths from basalts // J. Petrol. – 1975. – V. 6. – P. 454–487.
7. Пугачева Е.Е. Петрология гипербазитов Шаманского массива (Средневиетнамская горная страна): автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Томск: Изд-во ТГУ, 1996. – 18 с.
8. Вернон Р.Х. Метаморфические процессы. – М.: Недра, 1980. – 226 с.
9. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. – М.: Изд-во «Металлургия», 1970. – 376 с.
10. Николя А. Основы деформации горных пород. – М.: Мир, 1992. – 168 с.
11. Michibayashi K., Suzuki M., Komori N. Progressive deformation partitioning and recrystallization of olivine in the lithospheric mantle // Tectonophysics. – 2013. – V. 587. – P. 79–88.
12. Fabries I. Spinel-olivine geothermometry in peridotites from ultramafic complex // Contrib. Mineral. Petrol. – 1979. – V. 69. – № 4. – P. 329–336.
13. Roeder P., Campbell J., Jamieson H. A Re-Evolution of the olivine-spinel geothermometer // Contrib. Mineral. and Petrol. – 1979. – V. 68. – № 3. – P. 325–334.
14. Vauchez A., Tommasi A., Mainprice D. Faults (shear zones) in the Earth's mantle // Tectonophysics. – 2012. – V. 558–559. – P. 1–27.
15. Nicolas A., Poirier J.P. Crystalline plasticity and solid state flow in metamorphic rocks. – New York: Wiley-Interscience, 1976. – 444 p.
16. Natural olivine crystal-fabrics in the western Pacific convergence region: a new method to identify fabric type / K. Michibayashi, D. Mainprice, A. Fujii, S. Uehara, Yu. Shinkai, Yu. Kondo, Ya. Ohara, T. Ishii, F. Fryer, Sh.H. Bloomer, A. Ishiwatari, J.W. Hawkins, Sh. Ji // Earth and Planetary Science Letters. – 2016. – V. 443. – P. 70–80.

17. Preferred orientation in deformed metals and rocks: An introduction to modern texture analysis / Ed. by H.-R. Wenk. – London: Academic Press, 1985. – 610 p.
18. In situ observation of crystallographic preferred orientation of deforming olivine at high pressure and high temperature / T. Ohuchi, Yu. Nishihara, Yu. Seto, T. Kawazoe, M. Nishi, G. Maruyama, M. Hashimoto, Yu., K.-I. Higo Funakoshi, A. Suzuki, T. Kikegawa, T. Irifune // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2015. – V. 243. – P. 1–21.
19. Гончаренко А.И. Петроструктурная эволюция альпинотипных гипербазитов. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1989. – 398 с.
20. Piccardo G.B. Evolution of the lithospheric mantle during passive rifting: Inferences from the alpine-Apennine orogenic peridotites // Gondwana Research. – 2016. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1342937X16300107> (дата обращения: 20.02.2016).

Поступила 25.02.2016 г.

Информация об авторах

Чернышов А.И., доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой петрографии геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

Пугачёва Е.Е., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 552.321.6:552.164

HETEROGENEITY OF PLASTIC DEFORMATIONS OF OLIVINE IN ULTRAMAFIC ROCKS OF THE BAIKAL-MUYA OPHIOLITE BELT (NORTH-EAST OF BAIKAL)

Alexey I. Chernyshov¹,
aich@ggf.tsu.ru

Elena E. Pugacheva²,
E-mail: pugachevae@tpu.ru

¹ National Research Tomsk State University,
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

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

Relevance of the research. Permanently identified signs of plastic flow in ultramafic rocks predetermined an approach to their study as metamorphic rocks. This approach uses non-traditional method of the petrofabric analysis. This method allows reconstructing the chronological sequence of formation and plastic deformation of ultramafic rocks in the upper mantle-crust, revealing the general trend of structural and matter evolution, and solving a number of urgent problems of the ultramafic mineral genesis.

The aim of the study is to develop a scenario of the structural evolution of the Paramsky and Shamansky ultramafic massifs of the Baikal-Muya ophiolite belt at the upper mantle-crust levels through the dunite and harzburgite microstructural heterogeneity, typing their microstructures, calculating olivine-chromospinelide thermal equilibrium, and olivine petrofabric analysis.

Methods. The detailed petrographic characteristics of ultramafic rocks were performed by the polarizing microscope AxioScope-40 (Carl Zeiss). This study allowed carrying out microstructural typification of dunites and harzburgites. It was based on the morphological features of olivine and it was developed by many researchers. Quantification of deformation microstructures in olivine of ultramafic rocks was studied using the stereometric metallography. Microstructural analysis of olivine is an integral part of the petrofabric study of the ultramafic rocks. It allows determining the preferred orientation of minerals in the internal structure, which in their turn is a reflection of the thermodynamic conditions of their plastic deformation. The olivine and chromospinelide matter composition was determined using micro X-ray spectrum, obtained by microanalyser «Camebax» in the Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (Novosibirsk). The thermal equilibrium was calculated using olivine-chromospinelide Fabry geothermometer on the matter composition of coexisting olivine and chromospinelide.

Results. The research provided the identification of the deformation microstructures of olivine for dunites and harzburgites of the Paramsky and Shamansky ultramafic massifs of the Baikal-Muya ophiolite belt. They are grouped into six types: protogranular, mesogranular porphyroclastic, porphyrolath, mosaic (mosaic-lath), mosaic-parquet-like. The spatial distribution of the allocated microstructures in the studied massifs from the center to the periphery is characterized by reducing the grain size in the rocks. This feature shows the increase in their plastic deformation degree and reflects the dynamometamorphic zoning. The petrofabric analysis of the olivine in the identified microstructural types allowed determining thermodynamic conditions of their realization. These microstructures reflect a regressive trend of metamorphic transformations of the ultramafic rocks by high-temperature plastic deformations, syntectonic recrystallization, and secondary annealing recrystallization in formation, transformation and consolidation in the upper mantle – earth's crust. The identified evolution of the olivine microstructures reflects the limits of repeatedly overlaid plastic deformations, which can be decisive in localization of chromite, chrysotile asbestos, jade, and jadeite within ultramafic rocks of ophiolite complexes under favorable conditions.

Key words:

Ophiolites, ultramafic rocks, plastic deformations, dunite, harzburgite, olivine, petrofabrics, chromospinelide, geothermometer, temperature regimes.

REFERENCES

- Gordienko I.V., Bulgatov A.N., Orsoev D.A. Geodynamic settings and metallogeny of Sayan-Baikal mountain region. *Otechestvennaya geologiya*, 2013, no. 3, pp. 7–15. In Rus.
- Savelyeva G.N., Suslov P.V. Structure and composition of mantle peridotites at the boundary with crustal complexes of ophiolites in the Syumkeu massif, Polar Urals. *Geotectonics*, 2014, vol. 48, no. 5, pp. 3–16. In Rus.
- Chernyshov A.I. Petrostructural signature of olivines of ultramafic rocks of the Paramsky and Shamansky massifs (Baikal-Muya ophiolite belt). *Russian geology and geophysics*, 2005, vol. 46, no. 11, pp. 121–132. In Rus.
- Chernyshov A.I., Yurichev A.N. Petrostructural evolution of ultramafic rocks of the Kalninsky chromite-bearing massif, Western Sayan. *Geotectonics*, 2013, no. 4, pp. 31–46. In Rus.
- Kulkov A.S., Chernyshov A.I., Lychagin D.V., Tishin P.A. Recrystallization features in olivine from dunites of the Tarlaskinsk ultramafic massif: new data from the EBSD analysis of rock-forming grains. *Advanced Materials Research*, 2015, vol. 1085, pp. 319–323.
- Mercier J.C., Nicolas A. Textures, structures and fabrics of upper mantle peridotites, as illustrated by xenolites from basalts. *J. Petrol.*, 1975, vol. 6, pp. 454–487.
- Pugacheva E.E. *Petrologiya giperbazitov Chamanskogo massiva (Srednevitimskaya gornaya strana)*. Dis. Kand. nauk [Petrology of ultrabasic rocks of the Shamansky massif (Srednevitim Highland). Cand. Diss.]. Tomsk, 1996. 18 p.
- Vernon R.H. *Metamorficheskie protsessy* [Metamorphic processes]. Moscow, Nedra Publ., 1980. 226 p.
- Saltykov S.A. *Stereometricheskaya metallografiya* [Stereometric metallography]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 376 p.

10. Nicolas A. *Osnovy deformatsii gornykh porod* [Fundamentals of rocks deformation]. Moscow, Mir Publ., 1992. 168 p.
11. Michibayashi K., Suzuki M., Komori N. Progressive deformation partitioning and recrystallization of olivine in the lithospheric mantle. *Tectonophysics*, 2013, vol. 587, pp. 79–88.
12. Fabries I. Spinel-olivine geothermometry in peridotites from Ultramafic Complex. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1979, vol. 69, no. 4, pp. 329–336.
13. Roeder P., Campbell J., Jamieson H. A Re-Evolution of the olivine-spinel geothermometer. *Contrib. Mineral. and Petrol.*, 1979, vol. 68, no. 3, pp. 325–334.
14. Vauchez A., Tommasi A., Mainprice D. Faults (shear zones) in the Earth's mantle. *Tectonophysics*, 2012, vol. 558–559, pp. 1–27.
15. Nicolas A., Poirier J.P. *Crystalline plasticity and solid state flow in metamorphic rocks*. New York, Wiley-Interscience, 1976. 444 p.
16. Michibayashi K., Mainprice D., Fujii A., Uehara S., Shinkai Yu., Kondo Yu., Ohara Ya., Ishii T., Fryer F., Bloomer Sh.H., Ishiwatari A., Hawkins J.W., Ji Sh. Natural olivine crystal-fabrics in the western Pacific convergence region: a new method to identify fabric type. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, vol. 443, pp. 70–80.
17. *Preferred orientation in deformed metals and rocks: An introduction to modern texture analysis*. Edited by H.-R. Wenk. London, Academic Press, 1985. 610 p.
18. Ohuchi T., Nishihara Yu., Seto Yu., Kawazoe T., Nishi M., Maruyama G., Hashimoto M., Higo Yu., Funakoshi K.-I., Suzuki A., Kikegawa T., Irifune T. In situ observation of crystallographic preferred orientation of deforming olivine at high pressure and high temperature. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2015, vol. 243, pp. 1–21.
19. Goncharenko A.I. *Petrostrukturalnaya evolyutsiya alpinotipnykh giperbazitov* [Petrostructural evolution of ultrabasic rocks]. Tomsk, Tomsk University Publ., 1989. 398 p.
20. Piccardo G.B. Evolution of the lithospheric mantle during passive rifting: Inferences from the alpine-Apennine orogenic peridotites//Gondwana Research. 2016. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1342937X16300107> (accessed 20 February 2016).

Received: 25 February 2016.

Information about the authors

Alexey I. Chernyshov, Dr. Sc., professor, Head of the Department, National Research Tomsk State University.

Elena E. Pugacheva, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 553.411:551.1/.4

СТРУКТУРА ВОДОРАЗДЕЛЬНОЙ РУДНОЙ ЗОНЫ МНОГОВЕРШИННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА: ДАННЫЕ ПО ОТКРЫТЫМ ГОРНЫМ ВЫРАБОТКАМ И КЕРНУ СКВАЖИН

Сластников Виктор Валентинович^{1,2},
v_slastnikov@mail.ru

¹ Dongshan Investments Ltd., С/о BDO Chartered Accountants Advisors,
LOB 16, Office No. 124, P.O. Box 261253, Jebel Ali Free Zone, Dubai, UAE

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

Актуальность работы обусловлена необходимостью доизучения структуры Многовершинного месторождения золота с целью повышения точности прогнозирования размеров потенциально рудных жил при проведении разведочных работ.

Цель работы: уточнение строения рудной зоны Водораздельная Многовершинного месторождения золота.

Методы исследования. Определение кинематики перемещений по разрывным нарушениям было выполнено методами стрейн-анализа. Прослеживание на глубину структур и увязка их пересечений в открытых выработках и керне скважин выполнено по разработанной нами методике учета структурных данных по неориентированному керну.

Результаты. Выдвинута гипотеза о генетической связи отдельных систем разрывных нарушений с перемещениями по крупным разломам, определяющим структуру месторождения. Выделены системы сопряженных трещин, соответствующие дорудному, рудному, пострудному этапам становления месторождения. Результаты структурного анализа показывают, что основными рудо-контролирующими структурами являются трещины скола – сместители разрывов северо-восточного простирания, заложенные в прерудный этап и испытавшие подновление в рудный. На основе предложенной методики статистической обработки и учета углов к оси неориентированного керна проведен поиск рудоконтролирующих разрывных структур, прослеженных как на поверхности, так и бурением. Была подтверждена высокая вероятность их идентификации в керне скважин. Глубина экстраполяции выбрана исходя из наиболее вероятной максимальной глубины влияния рудоконтролирующих разрывов и глубины эрозионного среза. Замеренные для контактов жил углы к оси керна были пересчитаны в углы и азимуты падения с шагом поворота вокруг оси керна в 10° – для каждого замера рассчитаны 36 равновероятных положения. Из полученного массива данных по углу и азимуту падения были выбраны с определенным допуском замеры по элементам, сонаправленным структурным элементам, выделенным по поверхности. Таким образом, была оценена глубина развития отдельных систем трещин, относящихся к рудному этапу. Полученные результаты дают количественную характеристику выдержанности рудовмещающих трещин. Сформулированы требования к результатам документации керна для применения использованной методики для увязки пересечений по неориентированному керну.

Ключевые слова:

Дальний Восток России, Многовершинное месторождение, рудная зона Водораздельная, структурный анализ, стрейн-анализ, моделирование зон прожилкования, колонковое бурение.

Водораздельная рудная зона является фланговой частью Многовершинного месторождения золота (Многовершинный рудный район, Нижне-Амурский золоторудный пояс) [1]. Она расположена на водоразделе ручьев Улченка и Заманчивого, западнее г. Многовершинного, в лежачем боку северо-восточного окончания Главной рудной зоны, в юго-восточном экзоконтакте жерловины, контролирующей ее. Рудная зона изучалась в 1970–80-х гг. группами Э.П. Хохлова, Г.Е. Усанова, Н.Ф. Даниленко, С.И. Косова, С.И. Филина и др. По их данным, простирание рудной зоны северо-восточное. Состоит она из серии сближенных субпараллельных кварцевых жил и прожилок. Ее строение близко другим рудным зонам месторождения.

Решение производственной задачи по прогнозу перспективности флангов месторождения заставило нас провести ревизию данных о структуре месторождения и поставило ряд побочных задач, решение которых отражено в настоящей статье. Этими задачами стали: во-первых, выделение событий, определивших структуру рудной зоны и месторож-

дения в целом; во-вторых, разрешение методологического затруднения – провести геолого-структурное исследование только по имеющимся результатам документации открытых горных выработок и скважин и сформулировать его методику.

Геологическое строение рудной зоны Водораздельная

Рудная зона Водораздельная довольно компактна: протяженность зоны прожилкования около 800 м, рудной зоны – около 200 м. Падение жил северо-западное под углом 50°–60°. Вмещающими породами является осадочная толща, относимая к падалинской свите (верхняя юра). Сложена она ороговикованными песчаниками и алевролитами, смятыми в куполообразную антиклиналь с падением крыльев к западу и востоку под углами 60°–70°. На юго-востоке площади рудопроявления описан останец пород вулканогенной толщи, вероятно связанный с впадиной палеорельефа. Породы на площади рудопроявления прорваны рядом даек диоритовых порфиринов и разбиты серией субпараллельных разломов с простиранием от субширотного до севе-

ро-западного (280° – 290°). Перемещения по ним оцениваются до 20–50 м. Золотая минерализация отмечена как собственно в кварцевых жилах, так и в кварц-серицитовых метасоматитах по осадочным породам [1–6]. Толща осадочных пород повсеместно в различной степени окварцована. Золоторудная минерализация в зонах окварцевания приурочена к тонким прожилкам и просечкам кварца. Рудная зона, как и все месторождение, сравнительно глубоко эродирована [5, 7].

Методика анализа структуры рудной зоны

Целью исследования стало получение модели структуры Водораздельной рудной зоны с увязкой ее с принятыми моделями Многовершинного месторождения. Для этого требовалось, во-первых, охарактеризовать деформации, проявленные в пределах рудной зоны; во-вторых, выяснить очередность выделенных тектонических событий и связать их с этапами становления всего месторождения, как это было выполнено в [8]. Практическим применением полученной модели структуры рудной зоны стало использование ее как рабочей гипотезы при интерпретации результатов документации открытых горных выработок и керна скважин.

Анализ структуры рудной зоны был выполнен по массиву замеров элементов залегания (207 замеров), полученному в ходе проведения документации канав и расчисток во врезках дорог преимущественно в 2011–2012 гг. Отбор образцов для проведения исследований методом Фрая или Эллиотта (Rf/ϕ) [9, 10] в песчаниках и алевролитах, слагающих рудную зону, не проводился: для применения метода Эллиотта в них отсутствуют маркеры, а применение метода Фрая инструментально затруднено в производственной организации. Таким образом, исследование было проведено по имеющимся, заслуживающим доверия данным. В пределах рудной зоны могут быть выделены несколько структурных доменов: структура рудной зоны анализировалась для замеров, проведенных в одном структурном домене, выделенном по [9, 11].

Для каждого из типов структур (контакты, прожилкование, трещиноватость) были построены диаграммы распределения полюсов трещин. По ним были отстроены основные системы трещин и контакты литологических разностей [9, 12, 13]. Разброс полученных значений не позволил однозначно интерпретировать их без выделения наиболее информативных систем трещин: систем сопряженных трещин, так как для них возможно установление направлений перемещений. Выделение систем сопряженных трещин было проведено по геометрическому признаку: три системы трещин пересекаются под равными углами [9, 11, 14], отдельно для систем кварцевых прожилков и сухих трещин. Такой же анализ был проведен автором для рудной зоны Чайная, также относящейся к Многовершинному рудному полю [15]. По его ре-

зультатам была построена модель потенциально рудных зон прожилкования и оценено влияние способа геометризации на их объем.

Всего в пределах южного и центрального блоков Водораздельной рудной зоны было выделено 5 сопряженных систем трещин отрыва и скалывания, три из них включают рудовмещающие структуры – кварцевые жилы и метасоматиты (рис. 1).

Результаты анализа структуры рудной зоны

Проведенный анализ позволил выдвинуть гипотезу о становлении структуры рудной зоны Водораздельная в рамках развития Многовершинного месторождения. Были выделены три этапа формирования структуры Водораздельной рудной зоны. Система сопряженных трещин 1 (рис. 2) интерпретируется как относящаяся к **дорудному этапу** и соответствует обстановке левостороннего сбросо-сдвига. Образование последнего может быть связано с перемещениями по Леоульскому разлому, интерпретируемому по направлению оперяющих трещин отрыва и эрозионному срезу на его бортах, так же как левосторонний сбросо-сдвиг. Заложены на этом этапе крутопадающие трещины отрыва параллельны рудоконтролирующим разломам рудных зон Многовершинного месторождения (Главной, Промежуточной, пр.), рис. 3. По данным трещинам отрыва прошла циркуляция растворов, вызвавших образование кислых метасоматитов. Следует отметить, что образование пологопадающих тел метасоматитов Водораздельной рудной зоны, в отличие от таковых в центральной части Многовершинного месторождения, по условиям залегания скорее относятся к рудному этапу, а в дорудный этап сформировалась часть разломов северо-западного простирания. Последнее подтверждается соотношением жильных тел, рудных зон и грабеновой структуры.

Рудный этап развития структуры рудного поля представлен тремя системами сопряженных трещин (№№ 2, 3, 4), по части которых происходило образование кварцевых жил и метасоматитов. В пределах рудного поля происходила активизация Леоульского разлома в ситуации растяжения в грабеновой структуре, ограниченной Среднеульским и Кулибинским разломами. Плоскости сместителей отвечают трещинам отрыва дорудного этапа основных рудных зон Многовершинного месторождения (Главной и Промежуточной), только по ним шло образование кварцевых жил и метасоматитов (рис. 3). Представляется вполне вероятным, что метасоматоз предшествовал образованию кварцевых жил и отложению руды, как это происходило в остальных рудных зонах Многовершинного месторождения по данным разведочных работ, проведенных группой Э.П. Хохлова в период с 1976 по 1980 г. Сопряженные трещины скалывания и отрыва в этот период были закрыты, к ним не приурочены метасоматиты или жилы (рис. 1, 2).

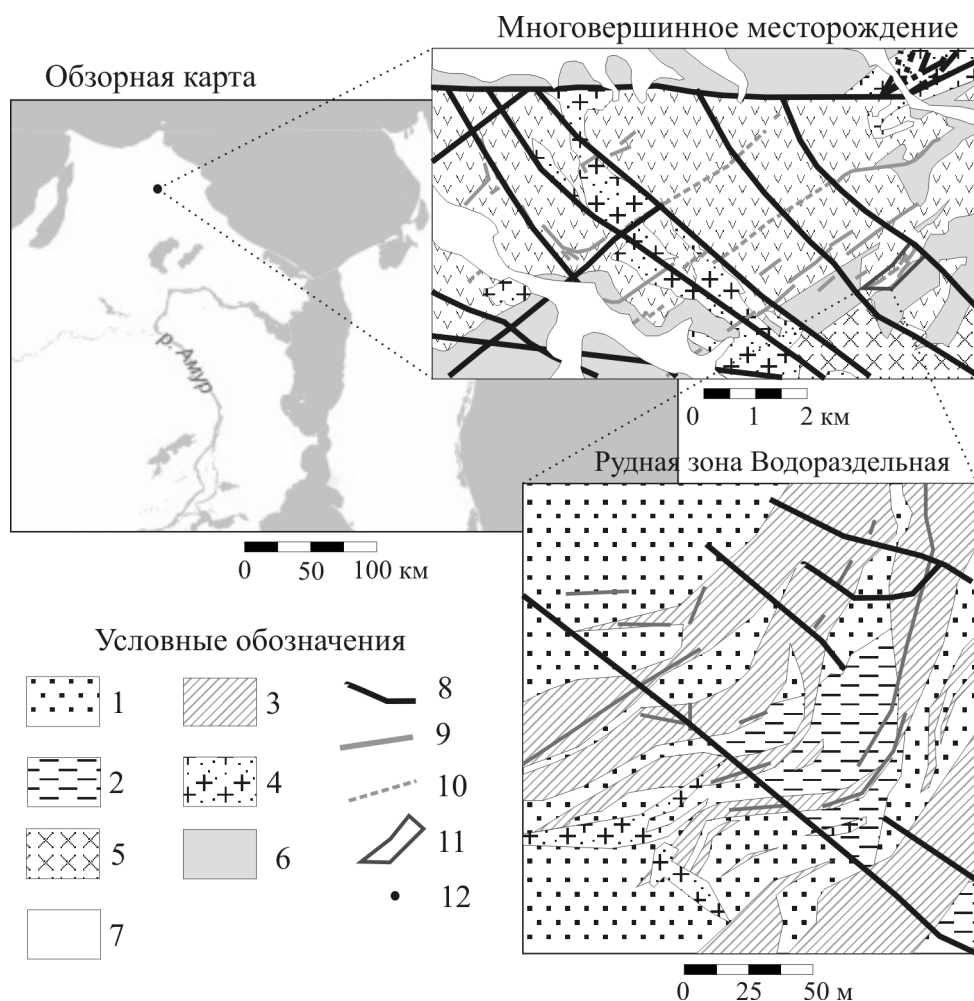


Рис. 1. Схема геологического строения Водораздельной рудной зоны и основных разломов Многовершинного рудного поля с элементами обзорной карты. По материалам: [16], отчетов по разведке Многовершинного золоторудного месторождения за 1979–1985 гг., [17]. Условные обозначения: 1 – песчаники; 2 – алевролиты; 3 – метасоматиты полнопроявленные кварцевые, кварц-серicits-адуляровые, дат-палеоценовый вулканоплутонический комплекс; 4 – дайки диорит-порфиров; 5 – гранодиориты, граниты; 6 – эффузивные и субвулканические фации андезитов; 7 – современные аллювиальные отложения; 8 – основные разрывные нарушения; 9 – кварцевые жилы и зоны прожилкования, выходящие на дневную поверхность; 10 – слепые кварцевые жилы и зоны прожилкования; 11 – контур рудной зоны Водораздельная; 12 – Многовершинное месторождение

Fig. 1. Scheme of geological structure of Vodorazdelnaya ore zone and the main faults of Mnogovershinnoye ore field with the area map. Based on the materials from [16], reports on exploration of the MNV gold deposit (1979–1985) and [17]. 1 are the sandstones; 2 are the siltstones; 3 are the quartz and quartz-sericite-adularite metasomatic rocks; 4 are the diorite-porphry dykes; 5 are the granitoid and granitoid rocks; 6 are the effusive and subvolcanic andesite facies; 7 are the contemporary alluvial deposits; 8 are the main faults; 9 are the quartz veins and veinlet zones on the surface; 10 are the « blind » quartz veins and veinlet zones; 11 are the borders of the Vodorazdelnaya ore zone; 12 is the Mnogovershinnoye ore deposit

Размах открытия трещин можно оценить по мощности жил. Используя соотношение перемещения по разрыву к его мощности по падению и простиранию по [18] как 1:20:60, при мощности жил около 1 м, по данным бурения влияние растягивающей составляющей по падению может быть оценено от 20 до 60 м для погребенных жил. С другой стороны, большинство вскрытых канавами жил представляют серии линз и зон интенсивного прожилкования, прослеживающиеся по простиранию на 220–250 м. По падению они уверенно сле-

дятся на глубину 30–50 м, азимут и угол падения неизменны. Таким образом, зона влияния деформаций при условии неоднородности эрозионного среза, вызванной различным положением жил на склоне сопки, может быть оценена в 20–60 м. Данная оценочная глубина была использована нами как граница экстраполяции результатов структурного анализа на глубину.

Пострудный этап. Представлен системой сопряженных трещин № 5, отвечающей левостороннему взбросо-сдвигу. Наиболее вероятна его связь

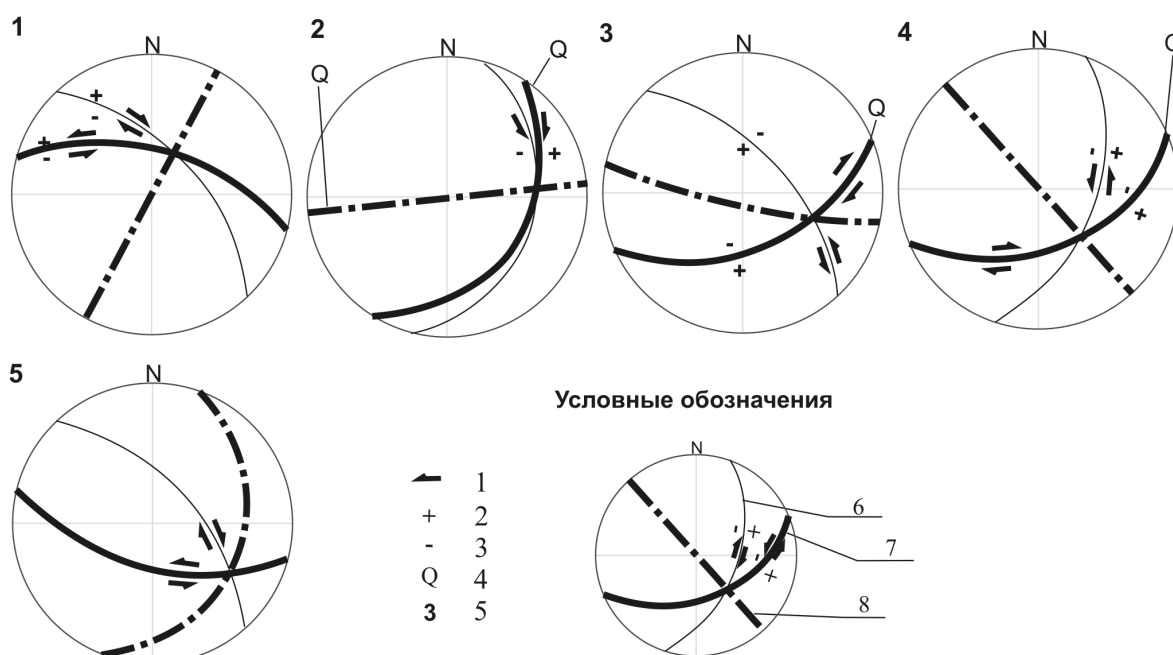


Рис. 2. Системы сопряженных трещин. Равноугольная проекция на верхнюю полусферу. 1 – направление смещения по горизонтали; направление смещения по вертикали: 2 – приподнятый блок, 3 – опущенный блок; 4 – развитие по трещине кварцевых жил или зон кислотного выщелачивания; 5 – номер сопряженной системы трещин; 6 – сопряженная трещина на скола; 7 – сместитель; 8 – трещина отрыва. Описание выделенных систем сопряженных трещин: 1 – сбросо-сдвиг левосторонний, близок по простиранию Лёвоулскому разлому. Предполагается обстановка растяжения и тангенциального сжатия, дорудный этап. 2, 3, 4 – сбросо-сдвиг правосторонний. Предполагается обстановка растяжения и тангенциального сжатия, рудный этап. 5 – взбросо-сдвиг левосторонний. Предполагается обстановка тангенциального сжатия, пострудный этап.

Fig. 2. Systems of conjugated fractures. Equiangular projection to the upper hemisphere. 1 is the horizontal shift; vertical shift: 2 is the elevated block, 3 is the downdip block; 4 are the quartz veins or acidic leaching zones upon the fracture; 5 is the number of the conjugated joint system; 6 is the conjugated shear fracture; 7 is the fault plane; 8 is the rupture. Description of the investigated systems of conjugated fractures: 1 is the left-down shift, direction is close to Levoulsky fault. The assumed conditions are dilation and tangential contraction, pre-ore stage. 2, 3, 4 is the right-down shift. The assumed conditions are dilation and tangential contraction, ore stage. 5 is the left-up shift. The assumed condition is the tangential contraction, post-ore stage

с подвижками по Среднеулскому разлому, сопровождавшимися внедрением даек пострудного комплекса эоценового возраста. Направление движения по разлому реконструируется как левосторонний сбросо-сдвиг по дайковому комплексу в трещинах отрыва в северном (приподнятом) борту, сопряженные трещины скалывания по простиранию параллельны Лёвоулскому и Южному разломам, между которыми прошло внедрение крупного дайкового массива (рис. 3). Отсутствие внедрения даек по рудным зонам северо-восточного простирания может объясняться как их косым положением относительно систем сопряженных трещин данного этапа, так и наличием мощной ослабленной зоны Лёвоулского разлома. Рудопроявление Водораздельное в пострудный этап находилось в зоне относительного сжатия, что доказывается как построениями по Среднеулскому разлому, так и системе сопряженных трещин 5. В рамках настоящей работы мы рассмотрели структуру рудной зоны Водораздельной и возможные связи со структурой Многовершинного рудного поля. Проведение дальней-

ших исследований структур отдельных рудных зон Многовершинного рудного поля, как разрабатываемых, так и периферийных, позволит установить ведущие факторы тектонической активности на разных этапах его становления. Так, влияние соседствующего Бекчи-Улского многофазного интрузивного массива, внедрение которого по [19] может быть отнесено к рудному и пострудному этапам, на становление структур рудного поля отмечалось, к примеру, в [1, 9, 15] и в отчетах о проведении разведочных работ на Многовершинном месторождении за 1973, 1975, 1980 гг., но в рамках исследований на отдельных структурных доменах выделение его из общей картины дискуссионно.

Верификация результатов исследования возможна повторными полевыми исследованиями на стадии эксплуатационной разведки рудной зоны Водораздельная, как это было сделано на золотоносном рудном поле Чартерс-Тауэрс в Австралии – с опорой на интерпретацию геофизических данных и стрейн-анализ [21]. Сопоставимые результаты могут быть получены при проведении исследова-

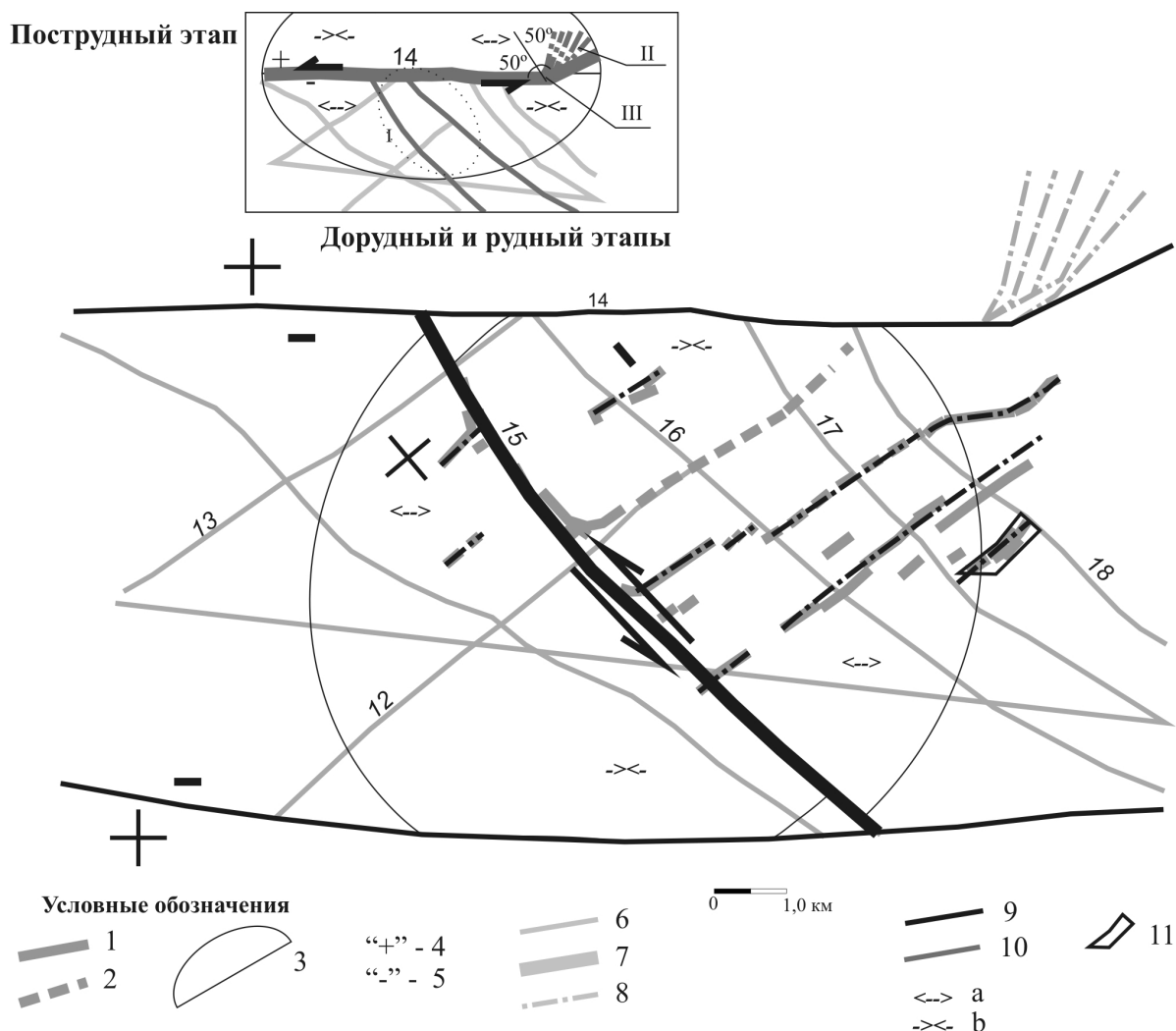


Рис. 3. Схема поэтапной активизации разрывных нарушений Многовершинного рудного поля [16, 20]. Кварцевые жилы и штокверки: 1 – достоверные, 2 – предполагаемые, «слепые»; 3 – эллипсоид деформации, вызванной перемещениями по разрывному нарушению; 4 – поднятый блок; 5 – опущенный блок. Разрывные нарушения: 6 – без уточнения генезиса; 7 – трещина скола – основной сместитель; 8 – трещина отрыва; 9 – разрывные нарушения, относимые к рудному этапу; 10 – разрывные нарушения, относимые к пострудному этапу; 11 – рудная зона Водораздельная. Разломы: 12 – Салалинский; 13 – Конечный; 14 – Среднеулский; 15 – Легоулский; 16 – Южный; 17 – Средний; 18 – Перевальный; а – сжатие, b – растяжение. I – внедрение даек по подновленным разломам СЗ простирания; II – внедрение даек по трещинам отрыва в условиях растяжения; III – трещины скола, параллельные Легоулскому разлому

Fig. 3. Scheme of stepwise activation of faults of Mnogovershinnoye ore field, based on [16, 20]. Quartz veins and stockworks: 1 – proved; 2 – assumed and «blind» ones; 3 is the ellipsoid of deformation; 4 is the elevated block; 5 is the downdip block. Faults: 6 – with undefined genesis; 7 is the cleavage crack (faults) – the main deposer; 8 is the tensile crack; 9 are the ore stage faults; 10 are the post-ore stage faults; 11 is the Vodorazdelnaya ore zone. Main faults: 12 – Salalinsky; 13 – Konechny; 14 – Sredneulsky; 15 – Levoulsky; 16 – Yuzhny; 17 – Sredny; 18 – Perevalny; a is the contraction, b is the dilation. I is the intrusion of dykes upon the renovated NW faults. II is the intrusion of dykes upon tensile cracks under dilation; III are the cleavage cracks, parallel to Levoulsky fault

ния тектонизированных пород [22]. Вторым способом проверки истинности выдвигаемой модели может стать дешифрирование аэрофотоснимков с верификацией гипотез о строении всего рудного узла, как это было сделано, к примеру, для области Оуачита (Ouachita) в Техасе [23] или складчатой области на Крите [24].

Методика учета результатов структурного анализа при интерпретации результатов документации керна

При документации керна в 2011–2012 гг. был накоплен массив замеров углов структурных элементов (контактов, зон брекчирования, дробления и пр.) к оси неориентированного керна.

Изучение структуры рудной зоны, ее тектонического строения является ключевым методом моделирования рудных тел и прогноза их размещения [25, 26]. Площадь рудной зоны была детально изучена с поверхности, однако не был до конца решен вопрос о прослеживании потенциально рудоносных структур на глубину: по имеющимся данным была возможность построения нескольких моделей. Получение результатов анализа структур по поверхности заставило провести проверку их репрезентативности при экстраполяции на некоторую глубину, которая эмпирически была определена как максимальная граница влияния деформаций, сформировавших структуры, выходящие на дневную поверхность. С учетом эрозионного среза эта величина оценена в 20–60 м – так как жилы простираются вкрест гребню, то минимальная эродированность и максимальная глубина границы приходится на гребень сопки, минимальная – на склоны в распадках. Подобная экстраполяция результатов анализа структур по документации открытых горных выработок была успешно использована при построении альтернативной модели рудовмещающих тел рудной зоны Чайная, расположенной на западном фланге Многовершинного рудного поля [15].

Для экстраполяции структурных данных была сделана выборка замеров углов к оси керн четко идентифицируемых контактов. Таким образом снижалось влияние «человеческого фактора», так как описание контактов строго контролируется при документации керн [27]. Массив данных прошел обработку по следующему алгоритму:

1. Произведена выборка замеров контактов, принадлежащих области до границы экстраполяции результатов структурного анализа.
2. Для полученной выборки произведен расчет всех возможных положений структурного элемента относительно оси керн с шагом вращения вокруг оси керн в 10° : удвоенной точности замера угла структурного элемента, которая составляет по опыту работы около 5° . Таким образом, для каждого замера рассчитаны 36 равновероятных положений. Применение данного способа базируется на равной вероятности положений, получаемых при повороте структурного элемента вокруг оси керн. Методика расчетов описана ниже.
3. Из полученного массива данных выбраны варианты, по углу и азимуту падения согласующиеся с элементами залегания отдельных систем трещин, выделенных по результатам анализа структуры рудной зоны в пределах определенного допуска. При повороте структурного элемента вокруг оси керн, моделирующем неупорядоченную его ориентацию, вектор направления падения структурного элемента описывает конус, форма которого задается углом элемента к оси керн. Таким образом, по расчетным положениям структурного элемента, замеренного

по керну, можно связать его со структурным элементом, азимут и угол падения которого были замерены на поверхности. Степень достоверности такого сравнения обратно зависит от ширины окна сравнения и выбора глубины экстраполяции: узкое окно сравнения, близкое к точности проведения полевых измерений, и малая глубина экстраполяции повышают достоверность [28, 29]. Лучшие условия проведения экстраполяции соблюдаются, если анализируемый интервал в скважине отстоит от горной выработки, где измерялись элементы залегания экстраполируемого структурного элемента, на расстояние меньшее, чем длина по падению зоны развития анализируемого структурного элемента – жилы, штокверка или системы сухих трещин.

Окно сравнения, примененное нами, составило $\pm 5^\circ$ (высокая достоверность) и $\pm 10^\circ$ (низкая достоверность, двойная случайная ошибка и допуск на неровности контактов). Более узкое окно сравнения не применимо, так как оно меньше шага пересчета элементов залегания и по опыту полевых работ соответствует точности измерения угла к оси керн документатором средней квалификации. Окно сравнения более 20° ($\pm 10^\circ$) чрезмерно снижает достоверность экстраполяции, так как приближается к стандартному отклонению рассчитанных углов падения ($31,13^\circ$), что неминуемо приведет к включению в выборку дублирующих значений.

Расчет возможных значений элементов залегания был проведен в табличном процессоре Open Office Calc по алгоритму, приведенному ниже:

Поставим задачу: рассчитать для структурного элемента набор возможных элементов залегания, соответствующих ряду его положений при повороте вокруг оси керн. Полученные данные должны быть пригодны и удобны для систематизации и анализа.

Пусть

L – глубина замера по стволу скважины,
 A – пикет замера инклинометрии на глубине $L-1$,
 B – пикет замера инклинометрии на глубине $L+1$,
 α – угол бурения от горизонта,
 β – азимут бурения,
 γ – угол падения элемента,
 η – азимут падения элемента,
 θ – угол элемента к оси керн (о. к.), измеренный на глубине L ,
 M – плоскость бурения, $A \in M, B \in M$,
 H – горизонтальная плоскость, $\gamma_H = 0, M \perp H$.

1. Рассчитаем угол падения элемента по методу расчета в программном продукте Micromine – как линейную сумму угла бурения и угла к о. к.

$$\gamma = \theta - \alpha.$$

Тогда $\gamma \in [0^\circ; 180^\circ]$ – для бурения в нижней или верхней полусфере, и мы получаем два равновероятных положения элемента, отличных только поворотом элемента вокруг оси керн на 180° (ось керн в описываемом построении – ось второго порядка):

$\gamma_1 = \theta - \alpha$ такое, что $\gamma_1 > \alpha$ и $\gamma_2 = \alpha - \theta$ такое, что $\gamma_2 > \alpha$.

Чтобы разрешить эту неопределенность, примем, что $\gamma < \alpha$;

$$\gamma = \alpha - \theta; \gamma \in [0^\circ; 90^\circ]; \gamma < \alpha.$$

2. Азимут и угол падения структурного элемента могут быть заданы в трехмерном пространстве с помощью вектора. Такой способ визуализации используется в программном продукте Micromine (инструмент «структурные диаграммы»). Необходимой и достаточной его характеристикой является его направление – он по построению может быть аппроксимирован единичным вектором.

Выберем декартову систему координат (ДСК) с началом отсчета в точке замера угла элемента к оси керна O на расстоянии L от устья скважины. Ориентировка осей стандартная для ГИС: ось Z направлена в зенит, X – на восток, Y – на север. Для каждой рассматриваемой ниже плоскости проецирования OD начало координат находится в точке O . Буквенное обозначение плоскости, на которую спроецирован вектор OD , указывается в виде нижнего индекса. Так же указываются оси координат. Пример: OD_M – проекция вектора OD на плоскость M .

3. Вращение элемента вокруг трассы скважины можно представить как поворот вектора OD_K вокруг начала координат на некоторый угол φ . Данное вращение переводит структурный элемент из стандартной ориентировки в нестандартную.

Пусть вектор OD такой, что

$$\gamma_{OD} = \gamma; \alpha_{OD} = \alpha; OD \in M.$$

Построим плоскость K такую, что $K \perp M; AB \perp K$.

В плоскости K зададим двумерную систему координат, так, чтобы

$$O(0; 0); Y_K = Y_M \cos \alpha; X_K = 0.$$

Спроецируем OD на плоскость K :

$$OD \rightarrow OD_K, X_K(D) = 0; Y_K(D) = \frac{Y_M(D)}{\cos \alpha}.$$

Выберем угол φ . Так как для решения задачи необходим и достаточен расчет положения структурного элемента в пределах одного полного поворота вокруг оси керна при одном известном положении, то $\varphi \in \{0^\circ; 360^\circ\}$. Получим величину необходимого и достаточного числа положений n структурного элемента, рассчитанную по углу φ

$$n = 2\pi / \varphi.$$

Вычислим координаты OD_K после поворота на угол φ :

$$OD'_K(Y_K \sin \varphi; Y_K \cos \varphi) \rightarrow X(D')_K = Y(D)_K \sin \varphi;$$

$$X(D')_K = Y_K \cos \varphi.$$

4. Вычисление элементов залегания для нестандартной ориентировки структурного элемента производится проецированием полученного вектора на плоскости L и M .

Вычисление угла падения. Рассчитаем θ' : спроецируем повернутый вектор обратно на плоскость M , тогда по соотношению проекций на Y_K до

и после вращения получим выполаживание тета через угол оси Y_M и OD' :

$$|\theta'| = \cos^{-1}(\cos Y(D')_M).$$

Знак зависит от квадранта поворота: если $\varphi \in [0; 90]$, то $\theta' = \gamma_1 - \alpha$; если $\gamma < 0$, то азимут падения элемента равен азимуту бурения.

5. Вычисление азимута падения для нестандартной ориентировки.

Спроецируем полученный вектор OD' на плоскость H . Угол между плоскостями H и

$$KH \wedge K = \frac{\pi}{2} - \alpha.$$

Тогда

$$X_H = X_K \cos \alpha; Y_H = Y_K \sin \alpha;$$

$$X(D')_H = X(D')_K \cos \alpha; Y(D')_H = Y(D')_K \sin \alpha.$$

Обозначим отклонение азимута при вращении как $\beta(\varphi)$:

$$\beta(\varphi) \tan^{-1}(X_H / Y_H);$$

$$\beta' = \beta + \beta(\varphi);$$

$$\beta' = \beta + \tan^{-1} \left(\frac{X(D')_K \cos \alpha}{Y(D')_K \sin \alpha} \right).$$

Используя полученные соотношения, рассчитаем для каждого нестандартного положения угол и азимут падения. Выберем угол поворота, удовлетворяющий нашим задачам: во-первых, его величина должна быть сопоставима с ошибками замеров азимута и угла падения. Во-вторых, требуется учет природной изменчивости измеряемых элементов залегания. Таким образом, при обычной точности замеров около 5° для жильного месторождения 3–4 группы сложности, соответствующей исследуемой рудной зоне [30], угол поворота составит от 10° до 30° .

6. Расчеты для угла к о. к., заданного в виде диапозона. В практике документации керна часто встречается запись не всех углов для ряда систем структурных элементов, а только минимальный и максимальный. В таком случае с шагом, равным выбранному углу φ проводится расчет промежуточных значений угла к о. к.

Результаты интерпретации документации керна с учетом структурных данных и их обсуждение

Сравнение расчетных элементов залегания по неориентированному керну было выполнено для систем сопряженных трещин, отнесенных нами к рудному этапу.

Были выделены три системы трещин, по которым с наибольшей вероятностью образовывались кварцевые жилы и кварцевые или кварц-серицит-адуляровые метасоматиты (см. таблицу). Две из них соответствуют предполагаемым сместителям систем 3–5, одна – трещине отрыва системы 2. После пересчета получено соответствие им 16 (64 %) контактов кварцевых жил и тел метасоматитов,

Таблица. Результаты экстраполяции трещин с поверхности на контакты по неориентированному керну

Table. Results of extrapolation of fractures from surface to the contacts by random core

| Параметры/тип трещины Fracture parameters/type | Сопряженные трещины Conjugated fractures | Трещина Fracture | Аз. пад. Azimuth of dipping | Угол пад. Dipping angle | Жильные тела Veins | Увязка Analog in the well | Падение Dipping | Альтернативная система трещин Alternative crack system |
|--|---|---------------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------------|---------------------|---|
| Сместитель (скола) Cleavage fractures (deposer) | 2 | 11 | 303 | 29 | Да/Yes | Линзы/Lens | Пологое/Fairly flat | 10 |
| | 3 | 6 | 337 | 45 | | | | |
| | 4 | 6 | 337 | 45 | | | | |
| Отрыва Tensile fractures | 2 | 2 | 354 | 89 | Нет/No | - | - | - |
| | 3 | 3 | 12 | 80 | | | | |
| | 4 | 18 | 228 | 90 | | | | |
| Оперяющая (скола) Feather fractures (cleavage) | 2 | 12 | 285 | 25 | Да/Yes | Линзы/Lens | Пологое/Fairly flat | 10 |
| | 3 | 15 | 227 | 55 | Нет/No | - | - | - |
| | 4 | 10 | 290 | 49 | Да/Yes | Линзы/Lens | Крытое/Steep | 2, 12 |

Примечание: трещины 2, 6, 11 на поверхности вмещают кварцевые и кварцсодержащие метасоматиты; серый фон ячеек для контактов жильных тел, элементы залегания измерены на дневной поверхности.

Note: fractures 2, 6, 11 contain quartz and quartz-bearing metasomatic rocks on the surface; gray cells are for quartz vein contacts, bedding elements are measured on the daylight surface.

5 (20 %) дайковых тел базальтов и диоритовых порфириров, 4 (16 %) слоев песчаников. Соответствие не установлено для 10 (53 %) контактов кварцевых жил и тел метасоматитов, 2 (11 %) дайковых тел базальтов, 7 (37 %) слоев песчаников. Во многих случаях одному замеру могли быть отнесены более одной системы трещин. Трещинам отрыва систем 3 и 18, оперяющей скола 15 не соответствуют контакты жильных тел, что подтверждает результаты анализа структур по данным документации открытых горных выработок. Система трещин 12 идентифицируется на краю окна сравнения $\pm 10^\circ$ как альтернативная системе 10. Последняя система оперяющих трещин скола идентифицирована в качестве альтернативной для большинства остальных систем.

Результаты экстраполяции представлены в таблице.

Проведенное исследование показало, что выделенные при анализе структур рудного этапа потенциально рудоконтролирующие системы разрывных нарушений могут быть прослежены на глубину по контактам тел метасоматитов кварцевого, кварц-серцитового и кварц-серцит-адулярового состава.

Уточнение модели увязки геологических тел, пересеченных скважинами с неориентированным керном, с помощью экстраполяции структурных данных из поверхностных или подземных горных выработок может быть рассмотрено как перспективный метод уточнения моделей жильных тел. Его практическая применимость зависит от соблюдения следующих условий:

1. Относительная простота тектонической истории месторождения. Как следствие – возможность выделить одну систему рудоконтролирующих нарушений. Выделение трех потенциально рудоконтролирующих систем разрыв-

ных нарушений на рудной зоне Водораздельной закономерно привело к снижению однозначности идентификации их в массиве данных по неориентированному керну.

2. Наличие надежных замеров элементов залегания не только по открытым, но и по подземным горным выработкам, ориентированному керну. Как следствие – сокращение глубины экстраполяции данных и повышение надежности моделирования.
3. Использование при замере угла к оси керна шкал от 0° до 180° (или $\pm 90^\circ$) с заранее оговоренным направлением взятия замера, что позволяет учитывать встречные, пересекающиеся структурные элементы. Пример: угол к оси керна отсчитывается от забоя к устью скважины в диапазоне 0° до 180° .
4. Наличие в разрезе как крупных, хорошо прослеживаемых бурением жил, так и оперяющих их зон прожилкования. Для последних применение предлагаемого метода наиболее перспективно.
5. Высокие требования к качеству и полноте описания керна, ее унификации по единому шаблону [31], запись результатов документации керна в базы данных, позволяющие оперировать крупными объемами информации, до нескольких десятков тысяч замеров. Последнее было показано в [32]. Заметим, что использование баз данных так или иначе неизбежно при переходе от двумерного к трехмерному моделированию рудных тел или построению модели литологического строения участка (к примеру, для коллектора или водоносного горизонта) [33, 34], что является распространенным требованием для отчетных материалов на завершающих стадиях разведочных работ.

Выводы

1. Выдвинута гипотеза о становлении структуры рудной зоны Водораздельная в рамках развития Многовершинного месторождения. Выделены три этапа формирования структуры Водораздельной рудной зоны: дорудный, рудный и пострудный. Каждому этапу соответствуют свои системы сопряженных трещин.
2. Дорудный этап: образование левостороннего сбросо-сдвига на рудной зоне Водораздельная наиболее вероятно связано с перемещениями по Североулскому разлому. Заложены на этом этапе круто падающие трещины отрыва параллельны рудоконтролирующим разломам рудных зон Многовершинного месторождения.
3. Рудный этап: плоскости сместителей отвечают трещинам отрыва дорудного этапа основных рудных зон Многовершинного месторождения (Главной и Промежуточной), только по ним шло образование кварцевых жил и метасоматитов. Сопряженные трещины скалывания и отрыва в этот период были закрыты, к ним не приурочены метасоматиты или жилы.
4. Пострудный этап: наиболее вероятно его связь с продвигками по Среднеулскому разлому, сопровождавшимися внедрением даек пострудного комплекса эоценового возраста. Отсутствие внедрения даек по рудным зонам северо-восточного простирания может объясняться как их косым положением относительно систем сопряженных трещин данного этапа, так и наличием мощной ослабленной зоны Североулского разлома.
5. Предложена методика статистического учета замеров элементов залегания плоскостных структурных элементов по неориентированному керну при проведении геолого-структурного исследования. Показана ее применимость на примере прослеживания систем сопряженных трещин рудного этапа на глубину: для каждой из выделенных в открытых горных выработках систем трещин были найдены наиболее вероятные ее следы в керне скважин.

Автор благодарит директора ООО «РДМ» В.Ю. Орешина за предоставление массива данных для проведения исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Золотоносность юга Дальнего Востока России и Северо-Восточного Китая / Н.П. Романовский, Ю.Ф. Малышев, Дуан Жуйянь, Чжу Цунь // Тихоокеанская геология. – 2006. – Т. 25. – № 6. – С. 3–17.
2. Пискунов Ю.Г., Моисеенко В.Г. Новые типы руд с высоким содержанием микро- и наночастиц благородных металлов // Материалы годичного собрания Российского минералогического общества. – СПб., 2006. – С. 51–54.
3. Секисов Г.В., Нигаи Е.В. Основные геолого-структурные типы золоторудных месторождений Дальневосточного региона России // ГИАБ. – 2008. – № 7. – С. 221–226.
4. Нигаи Е.В. Рудные формации и минералого-геохимические особенности месторождений благородных металлов Дальневосточного региона России // ГИАБ. – 2009. – № 6. – С. 245–254.
5. Фатьянов И.И., Хомич В.Г., Борискина Н.Г. Нетрадиционный метод типизации руд золотосеребряных месторождений (на примере Многовершинного месторождения, Нижнее Приамурье) // Вестник Том. гос. ун-та. – 2007. – № 304. – С. 211–217.
6. Юргенсон Г.А. Малоглубинные месторождения золота и серебра, условия образования и минералого-геохимическая технология их глубинных поисков и оценки // Ученые записки ЗабГГПУ. – 2011. – № 1 (36). – С. 136–145.
7. Эйриш Л.В., Сорокин А.П. Коренные источники золотоносных россыпей Дальнего Востока России, степень их эродированности // Тихоокеанская геология. – 2005. – Т. 24. – № 4. – С. 62–75.
8. Beaumont-Smith C.J., Lentz D.R., Tweed E.A. Structural analysis and gold metallogeny of the Farley Lake gold deposit, Lynn Lake greenstone belt (NTS 64C/16) // Report of Activities 2000, Manitoba Industry, Trade and Mines, Manitoba Geological Survey. – Winnipeg: Manitoba Geological Survey, 2000. – P. 73–81.
9. Родыгин А.И. Методы стрейн-анализа. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. – 168 с.
10. Kassem O.M.K., Abd El Rahim S.H. Finite Strain Analysis of Metavolcanics and Metapyroclastics in Gold-Bearing Shear Zone of the Dungash Area, Central Eastern Desert, Egypt // Geotectonics. – 2014. – V. 48. – № 6. – P. 484–497.
11. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1975. – 536 с.
12. Coelho C., Silva F. The structural control of the gold deposits of the Fazenda Maria. Preta gold district at Rio Itapicuru greenstone belt, northeastern Brazil // Revista Brasileira de Geociências. – Setembro de 1998. – № 28 (3). – P. 367–376.
13. Знаменский С.Е., Мичурин С.В. Условия образования золото-сульфидного месторождения Миндяк (Южный Урал): структурные и изотопно-геохимические аспекты // Литосфера. – 2013. – № 4. – С. 121–135.
14. Старостин В.И., Дергачев А.Л., Семинский Ж.В. Структуры рудных полей и месторождений. – М.: Изд-во МГУ, 2002. – 352 с.
15. Сластников В.В., Пискунов В.В. Структурные особенности и моделирование зон прожилкования рудной зоны Чайная, Многовершинное золоторудное месторождение (Нижнее Приамурье) // Естественные и математические науки в современном мире: сборник статей по материалам XIX Междунар. науч.-практ. конф. № 6 (18). – Новосибирск: Изд-во «СибАК», 2014. – С. 116–126.
16. Фатьянов И.И., Хомич В.Г., Борискина Н.Г. Скрытая зональность низкосульфидного золото-серебряного оруденения Многовершинного месторождения (Нижнее Приамурье) // ГИАБ. – 2010. – № 6 – С. 127–133.
17. Яндекс карты. Онлайн-сервис картографического сервиса. URL: [https://yandex.ru/maps/? ll=139.722937 % 2C53.890959&z=10](https://yandex.ru/maps/? ll=139.722937%2C53.890959&z=10) (дата обращения: 20.11.2015).
18. Мишин Н.И., Степина Н.А., Панфилов А.Л. Структурная организация рудных полей. – СПб.: Полиграфическая фирма «Автор, Акционер и Ко», 2007 – 232 с.
19. Физико-химические условия формирования пропилитов района месторождения Многовершинное (Нижнее приамурье) / Л.П. Плюснина, Г.Г. Лихойдов, Ж.А. Щека, И.И. Фатьянов // Тихоокеанская геология. – 2004. – Т. 23. – № 3. – С. 14–21.
20. Золото-серебряные месторождения. Серия: Модели месторождений благородных и цветных металлов / М.М. Константинов, Н.П. Варгунина, Т.Н. Косолец, С.Ф. Стружков, Е.Д. Сынгаевский, Л.Н. Шишакова. – М.: ЦНИГРИ, 2000. – 239 с.

21. Ore controls in the Charters Towers goldfield, NE Australia: Constraints from geological, geophysical and numerical analyses / O.P. Kreuzer, T.G. Blenkinsop, R.J. Morrison, S.G. Peters // *Ore Geology Reviews*. – 2007. – № 32. – P. 37–80.
22. Fault rock lithologies and architecture of the central Alpine fault, New Zealand, revealed by DFDP-1 drilling / V.G. Toy, C.J. Boulton, R. Sutherland et al. // *Lithosphere*. – 2015. – V. 7. – № 2. – P. 155–173.
23. Caran C.S., Woodruff C.M. (Jr.), Thompson E.J. Lineament Analysis and Interference of Geologic Structure – Examples from the Balcones/Ouachita Trend of Texas // *Transactions – Gulf coast Association of Geological Sciences*. – 1981. – V. XXXI. – P. 59–69.
24. Papadaki E.S., Mertikas S.P., Sarris A. Identification of lineaments with possible structural origin using ASTER images and DEM derived products in Western Crete, Greece // *EARSeL eProceedings*. – 1/2011 – № 10. – P. 9–26.
25. Structural analysis and vein episode of the Penjom Gold Deposit, Malaysia: Implications for gold mineralisation and tectonic history in the Central Belt of Malaysia / Z. Endut, T.H. Ng, J.H.A. Aziz, G.H. Teh // *Ore Geology Reviews*. – Sept. 2015. – V. 69. – P. 157–173.
26. Sylla S., Gueye M., Ngom P.M. New Approach of Structural Setting of Gold Deposits in Birimian Volcanic Belt in West African Craton: the Example of the Sabodala Gold Deposit, SE Senegal // *International Journal of Geosciences*. – 2016. – № 7. – P. 440–458.
27. Marjoribanks R. *Geological Methods in Mineral Exploration and Mining*. Second ed. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – 238 p.
28. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. В 2-х томах. Т. 1: пер. с англ. – М.: Мир, 1984 – 528 с.
29. Devore J. *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*. Ninth ed. – USA, Boston: Cengage learning, 2016. – 623 p.
30. Викентьев В.А., Карпенко И.А., Шумилин М.В. Экспертиза подсчетов запасов рудных месторождений. – М.: Недра, 1988. – 199 с.
31. *Geotechnical engineering manual: Rock core evaluation manual. Revision #2* // State of New York Department of transportation, Geotechnical engineering bureau. – 2015. – 21 p.
32. Sakurai M., Masuda F. Construction of Subsurface Geological Structures Using a Drilling Database: a Case Study for an Intra-Arc Basin, the Osaka Plain, Southwest Japan // *Open Journal of Geology*. – 2013. – № 3. – P. 39–43.
33. 3D Geology Modeling from 2D Prospecting Line Profile Map / Q.I. Li, Y. Cui, Ch.M. Chen et al. // *International Journal of Geosciences*. – 2015. – № 6. – P. 180–189.
34. Nouayti N., Khattach D., Hilali M. Contribution of the 3D Geological Model to the Study of the High Basin Ziz Jurassic Aquifers Structure (Central High Atlas, Morocco) // *Journal of Geographic Information System*. – 2015. – № 7. – P. 294–300.

Поступила 30.11.2015 г.

Информация об авторах

Сластников В.В., ведущий геолог, Dongshan Investments Ltd., С/о BDO Chartered Accountants Advisors; аспирант кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых Национального минерально-сырьевого университета «Горный».

UDC 553.411:551.1/.4

STRUCTURE OF VODORAZDELNAYA ORE ZONE OF MNOGOVERSHINNOYE (MNV) GOLD DEPOSIT: DATA ON OPEN SURFACE WORKINGS AND DIAMOND DRILLING CORE

Viktor V. Slastnikov^{1,2},
v_slastnikov@mail.ru

¹ Dongshan Investments Ltd., C/o BDO Chartered Accountants Advisors,
LOB 16, Office no. 124, P.O. Box 261253, Jebel Ali Free Zone, Dubai, UAE.

² National Mineral Resources University (Mining University),
2, 21 line of Vasilievsky Island, Saint-Petersburg, 199106, Russia.

The relevance of the discussed issue is caused by the need of further investigation of the MNV gold deposit tectonic structure.

The main aim of the study is to increase the probability of forecasting the spatial properties of ore-bearing vein zones.

The methods used in the study: strain-analysis of vein-containing structures and a new method of recognizing geological structures between the surface and the deep horizons using statistic data obtained from core documentation.

The results. The author has put forward the hypothesis on a genetic relation of individual fault systems in the Vodorazdelnaya ore zone and the movements upon major faults. These faults define the structure of the whole Mnogovershinnoye deposit. Few systems of ajoint cracks were dedicated. These fractures were formed before, after and exactly in the ore stage. The carried out analysis shows that shear cracks (the main faults with North-Eastern strike) were the ore-controlling structures. They were formed in pre-ore stage and then they were reactivated in the ore stage. The proposed method for recognizing geological structures is based on finding intersections (data extrapolation) between structural data obtained by open mining and the accounted results of undirected diamond drilling core documentation. The depth of extrapolation was chosen as a maximum dipping depth of single investigated fractures due to erosion. Strike and dip angles for contacts, measured against core axis, were calculated in 36 positions of equal probability as if the plane of the contact was turned around the core axis with 10° discretion. A pair of dipping azimuth and angle was the key to recognize the same structures in trenches and in the core. So the author could measure the vertical dimension of cracks and veinlets as well as their consistency and proposed the requirements for documentation of core for implementation of the discussed method.

Key words:

Russian Far East, Mnogoverchinnoye (MNV) ore deposit, Vodorazdelnaya ore zone, geological structures analysis, strain-analysis, modeling of veinlet zones, core drilling, diamond drilling.

The author thanks V.Yu. Oreshin, the director of «RDM», for the data for researches.

REFERENCES

- Romanovsky N.P., Malyshev Yu.F., Duan Zhuian, Chzu Tsun. Gold potential of the southern Far East, Russia, and Northeast China. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2006, vol. 25, no. 6, pp. 3–17. In Rus.
- Piskunov Yu.G., Moiseenko V.G. *Novye tipy rud s vysokim soderzhaniam mikro i nanochastits blagorodnykh metallov* [New types of ores with high bearing of micro and nano particles of precious metals]. *Materialy godichnogo sobraniya Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva* [Proc. of the annual meeting of the Russian Mineralogical Society]. Saint-Petersburg, 2006. pp. 51–54.
- Sekisov G.V., Nigay E.V. Main structural types of gold peposits of the Russian Far Eastern region. *GIAB*, 2008, no. 7, pp. 221–226. In Rus.
- Nigay E.V. Ore formations, mineralogical and geochemical features of precious metals deposits of the Russian Far East region. *GIAB*, 2009, no. 6, pp. 245–254. In Rus.
- Fatyanov I.I., Khomich V.G., Boriskina N.G. Non-traditional method for typing ores from gold-silver deposits (by the example of Mnogovershinnoye deposit, Lower Amur river region). *Tomsk State University Journal*, 2007, no. 304, pp. 211–217. In Rus.
- Yurgenson G.A. Subsurface gold and silver deposits, conditions of their genesis and mineralogical-geochemical method for their deep underground prospecting. *Scholarly Notes of Transbaikals State University*, 2011, no. 1 (36), pp. 136–145. In Rus.
- Eyrish L.V., Sorokin A.P. Mother lodes of gold-bearing placers of the Russian Far East, their erosional features. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2005, vol. 24, no. 4, pp. 62–75. In Rus.
- Beaumont-Smith, C.J., Lentz, D.R., Tweed, E.A. Structural analysis and gold metallogeny of the Farley Lake gold deposit, Lynn Lake greenstone belt (NTS 64C/16). *Report of Activities 2000, Manitoba Industry, Trade and Mines, Manitoba Geological Survey*. Winnipeg, Manitoba Geological Survey, 2000. pp. 73–81.
- Rodygin A.I. *Metody strain-analiza* [Strain-analysis methods]. Tomsk, Tomsk State University Publ. house, 2006. 168 p.
- Kassem O.M.K., Abd El Rahim S.H. Finite Strain Analysis of Metavolcanics and Metapyroclastics in Gold-Bearing Shear Zone of the Dungash Area, Central Eastern Desert, Egypt. *Geotectonics*, 2014, vol. 48, no. 6, pp. 484–497.
- Gzovsky M.V. *Osnovy tektonofiziki* [Fundamentals of tectonophysics]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 536 p.
- Coelho C., Silva F. The structural control of the gold deposits of the Fazenda Maria. Preta gold district at Rio Itapicuru greenstone belt, northeastern Brazil. *Revista Brasileira de Geociencias*, Setembro de 1998, no. 28 (3), pp. 367–376.
- Znamenskiy S.E., Michurin S.V. Conditions of formation of Mindyak gold-sulfide deposit (Southern Ural): structural and isotopic geochemical aspects. *Lithosphere*, 2013, no. 4, pp. 121–135. In Rus.
- Starostin V.I., Dergachev A.L., Seminskiy Zh.V. *Struktury rudnykh poley i mestorozhdeniy* [Structures of ore fields and deposits]. Moscow, MSU Publ. house, 2002. 352 p.
- Slastnikov V.V., Piskunov V.V. *Strukturnye osobennosti i modelirovanie zon prozhilkovaniya rudnoy zony Chaynaya, Mnogovershinnoye zolotorudnoye mestorozhdenie (Nizhnee Priamure)* [Structural features and modeling of vein zones of the Chainoye

- ore zone, MNV gold deposit (the Lower Amur River Region)]. *Estestvennyye i matematicheskie nauki v sovremennom mire. Sbornik statey po materialam XIX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Natural and mathematical sciences in the modern world. Proc. of XIX international science-practical conference]. Novosibirsk, SibAK Publ., 2014. No. 6 (18), pp. 116–126.
16. Fatyanov I.I., Khomich V.G., Boriskina N.G. Concealed zonality of gold and silver mineralization with low content of sulphide at the multi-apical deposit (Lower area of Amur river region). *GIAB*, 2010, no. 6, pp. 127–133. In Rus.
 17. Yandex maps. Online maps. Available at: <https://yandex.ru/maps/?ll=139.722937%2C53.890959&z=10> (accessed 20 November 2015).
 18. Mishin N.I., Stepina N.A., Panfilov A.L. *Strukturnaya organizatsiya rudnykh poley* [Structural organization of ore fields]. St. Petersburg, Avtor, Aktsioner i Ko. Publ., 2007. 232 p.
 19. Plyusnina L.P., Likhoydov G.G., Shcheka Zh.A., Fatyanov I.I. Physico-chemical conditions of propylite and pyroxene skarn formation of the Mnogovershinnoye deposit (Lower Amur River Region). *Russian Journal of Pacific Geology*, 2004, vol. 23, no. 3, pp. 14–21.
 20. Konstantinov M.M., Vargunina N.P., Kosovets T.N., Struzhkov S.F., Syngaevsky E.D., Shishakova L.N. *Zoloto-serebryanye mestorozhdeniya. Seriya: modeli mestorozhdeniy blagorodnykh i tsvetnykh metallov*. [Gold-silver deposits. Series: models of precious and base metals deposits]. Ed. by A.I. Krivtsov. Moscow, TsNIGRI Publ., 2000. 239 p.
 21. Kreuzer O.P., Blenkinsop T.G., Morrison R.J., Peters S.G. Ore controls in the Charters Towers goldfield, NE Australia: Constraints from geological, geophysical and numerical analyses. *Ore Geology Reviews*, 2007, no. 32, pp. 37–80.
 22. Toy V.G., Boulton C. J., Sutherland R. Fault rock lithologies and architecture of the central Alpine fault, New Zealand, revealed by DFDP-1 drilling. *Lithosphere*, 2015, vol. 7, no. 2, pp. 155–173.
 23. Caran C.S., Woodruff C.M. (Jr.), Thompson E.J. Lineament Analysis and Interference of Geologic Structure – Examples from the Balcones/Ouachita Trend of Texas. *Transactions – Gulf coast Association of Geological Sciences*. – 1981. – V. XXXI. – P. 59–69.
 24. Papadaki E.S., Mertikas S.P., Sarris A. Identification of lineaments with possible structural origin using ASTER images and DEM derived products in Western Crete, Greece. *EARSel eProceedings*, 1/2011, no. 10, pp. 9–26.
 25. Endut Z., Ng T.H., Aziz J.H.A., Teh G.H. Structural analysis and vein episode of the Penjom Gold Deposit, Malaysia: Implications for gold mineralisation and tectonic history in the Central Belt of Malaysia. *Ore Geology Reviews*, Sept. 2015, vol. 69, pp. 157–173.
 26. Sylla S., Gueye M., Ngom P.M. New Approach of Structural Setting of Gold Deposits in Birimian Volcanic Belt in West African Craton: the Example of the Sabodala Gold Deposit, SE Senegal. *International Journal of Geosciences*, 2016, no. 7, pp. 440–458.
 27. Marjoribanks R. *Geological Methods in Mineral Exploration and Mining*. Second ed. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2010. 238 p.
 28. Feller V. *Vvedenie v teoriyu veroyatnostey i ee prilozheniya* [Introduction into probability theory and its application]. Moscow, Mir Publ., 1984. Vol. 1, 528 p.
 29. Devore J. *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*. Ninth ed. USA, Boston, Cengage learning, 2016. 623 p.
 30. Vikentiev V.A., Karpenko I.A., Shumilin M.V. *Ekspertiza podschetov zapasov rudnykh mestorozhdeniy* [Expertise for calculating ore deposits stocks]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 199 p.
 31. *Geotechnical engineering manual: Rock core evaluation manual*. Revision #2, State of New York Department of transportation, Geotechnical engineering bureau. 2015, 21 p.
 32. Sakurai M., Masuda F. Construction of Subsurface Geological Structures Using a Drilling Database: a Case Study for an Intra-Arc Basin, the Osaka Plain, Southwest Japan. *Open Journal of Geology*, 2013, no. 3, pp. 39–43.
 33. Li Q.I., Cui Y., Chen Ch.M. 3D Geology Modeling from 2D Prospecting Line Profile Map. *International Journal of Geosciences*, 2015, no. 6, pp. 180–189.
 34. Nouayti N., Khattach D., Hilali M. Contribution of the 3D Geological Model to the Study of the High Basin Ziz Jurassic Aquifers Structure (Central High Atlas, Morocco). *Journal of Geographic Information System*, 2015, no. 7, pp. 294–300.

Received: 30 November 2015.

Information about the authors

Viktor V. Slastnikov, leading geologist, Dongshan Investments Ltd., C/o BDO Chartered Accountants Advisors; postgraduate, National Mineral Resources University (Mining University).

УДК 519.711.2

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ БИНАРНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

Семенов Борис Васильевич¹,
semenov062@yandex.ru

Шумкина Мария Валерьевна¹,
mashynya86rus@mail.ru

Лапик Наталья Владиславовна¹,
lnw2@yandex.ru

Попова Надежда Владимировна¹,
kafedra5@yandex.ru

¹ Институт геологии и нефтегазодобычи Тюменского индустриального университета,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 70.

Построение математических моделей течений неоднородных (многокомпонентных, многофазных) сред требует создания адекватного описания процессов переноса. При традиционных постановках задач процессов природного и техногенного характера, к которым относятся задачи атмосферных явлений, моделирования технологических установок и биологических систем, возникает необходимость учета многих особенностей, обусловленных присутствием примесной фазы, особенно с достаточно высокой концентрацией примесного компонента. Объем выбросов автотранспортных средств, негативно сказывающихся на состоянии атмосферы, напрямую зависит от качества производимых систем фильтрации и эффективности их работы, что объясняет крайнюю необходимость изучения процессов нейтрализации опасных газовых смесей. Исследование таких систем затрагивает фундаментальные аспекты реологии и описания систем при наличии крупномасштабных (обусловленных наличием несущей среды) межчастичных корреляций.

Актуальность работы обусловлена необходимостью решения одной из глобальных экологических проблем, в частности загрязнения воздуха вредными выбросами автотранспорта. Особое место в решении этой проблемы отводится системам нейтрализации, позволяющим снизить токсичность выхлопных газов автомобиля, и тем самым повысить его экологичность.

Объект исследований – процессы фильтрации бинарной газовой смеси выхлопных газов в бензиновых двигателях внутреннего сгорания в неизотермических условиях через фильтроэлемент, полученный с использованием самораспространяющегося высоко-температурного синтеза на основе карбида титана.

Метод исследования: микроскопический (молекулярно-кинетический) подход к реализации математической модели фильтрации двухкомпонентной смеси через пористую матрицу.

Результаты. Предложена математическая модель фильтрации двухкомпонентной газовой смеси в неизотермических условиях, получена длина фильтроэлемента, газодинамические коэффициенты (коэффициенты Кнудсеновской и взаимной диффузии, вязкость) для численной реализации модели.

Ключевые слова:

Фильтрация бинарной газовой смеси, модель, время протекания химической реакции, концентрация реагирующего вещества, энергия активации, компонент смеси, коэффициент Кнудсеновской диффузии, самораспространяющийся высокотемпературный синтез.

Введение

Изучение течений неоднородных (многокомпонентных, многофазных) сред связано с решением задач природного и техногенного характера, к которым относятся задачи моделирования технологических установок и биологических систем. Построение моделей таких течений требует создания адекватного описания процессов переноса, технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) для получения пористых проницаемых материалов. При традиционных постановках этих задач возникает необходимость учета многих особенностей, обусловленных присутствием примесной фазы, особенно с достаточно высокой концентрацией примесного компонента. Исследование таких систем затрагивает фундаментальные аспекты реологии и описания систем при

наличии крупномасштабных (обусловленных наличием несущей среды) межчастичных корреляций. Необходимо, чтобы результаты вычислений, согласно математической модели, согласовывались с физическим экспериментом и одновременно математическая модель должна быть достаточно простой для практического использования.

Описание процесса фильтрации бинарной газовой смеси

Существуют различные подходы к математическому описанию процессов фильтрации многокомпонентных газовых смесей, однако большинство всех исследователей рассматривают вопросы разработки математической модели с применением макроскопического подхода, с использованием уравнения Навье–Стокса, уравнения массового и

теплового баланса [1–7]. Для численной реализации такого подхода требуется:

- математическое описание геометрии порового канала;
- дискретизация производных конечными разностями на равномерных декартовых сетках;
- независимость формы записи линейных соотношений, аппроксимирующих краевые условия от вида уравнений для внутренних точек области.

Из выше рассмотренного подхода ясно, что он требует подробного описания геометрии поровых каналов, краевых и граничных условий, что практически невозможно для решения задачи фильтрации отработанных газов через фильтроэлемент со сложной внутренней геометрией [1, 8, 9].

Поэтому рассмотрим другой подход – молекулярно-кинетический, описывающий процессы переноса в пористых средах: модель запылённого газа. Он основывается на аддитивности вязкого и диффузионного потоков, используется весь аппарат кинетической теории Чепмена–Энскога [10, 11] для смеси газов, в которой пористая среда рассматривается как один из компонентов смеси. В этом подходе изменение давления можно формально описать через изменение мольной доли «пылевого» компонента.

Стремительное увеличение числа автомобилей на планете оказывает пагубное влияние на состояние окружающей среды и здоровье человека [12]. Вследствие неполного сгорания топлива в атмосферу выбрасываются такие токсичные химические вещества, как угарный газ (CO), оксиды серы (SO₂, SO₃), оксида азота (NO₂), а также твердые частицы золы [1, 13, 14]. Объем автомобильных выбросов, негативно сказывающихся на состоянии атмосферы, напрямую зависит от качества производимых систем фильтрации и эффективности их работы, что объясняет крайнюю необходимость изучения процессов нейтрализации опасных газовых смесей.

Актуальность подобных исследований обусловлена тем, что подобные явления реализуются в широком спектре природных, технических и технологических процессов.

В настоящей работе обсуждается процесс фильтрации бинарной газовой смеси в неизоотермических условиях. Течение смеси проходит через фильтроэлемент, полученный на основе технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, который представляет собой набор извилистых цилиндрических пор малого диаметра в твердом теле [15–17, 14].

В основе исследования лежат положения молекулярно-кинетической теории, главной идеей которой является модель «запыленного» газа. Её суть заключается в замене пористой среды системой «гигантских молекул». Фильтрация газа при этом предстает как простая диффузия газа и «пыли», что позволяет для построения теории воспользоваться готовыми результатами обычной ки-

нетической теории газов. Использование такой модели дает возможность точно описать процессы переноса газа в пористых смесях, а также сосредоточить внимание на формулах и результатах вычислений, избегая громоздких доказательств.

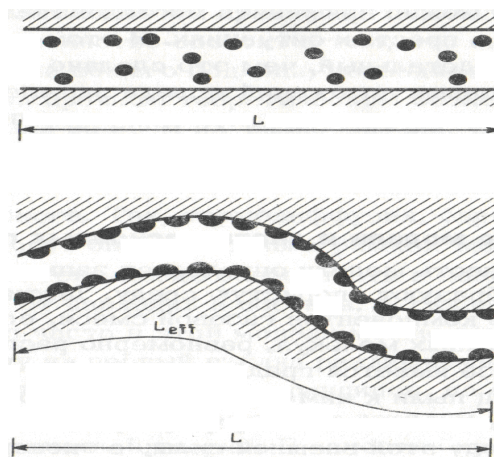


Рис. 1. Схематическое изображение модели запыленного газа

Fig. 1. Schematic representation of dusty gas model

Реализация задачи производится при помощи методов математического моделирования процессов фильтрации согласно следующей последовательности:

- расчет времени протекания химической реакции;
- расчет необходимых коэффициентов для проведения численного эксперимента;
- расчет скорости химической реакции и определение длины поры.

Результаты исследования

1. Расчет времени протекания химической реакции рассмотрим на примере CO+O₂

Для нахождения времени протекания любой химической реакции необходимо решать прямую задачу химической кинетики. Знание кинетического уравнения реакции в дифференциальной форме позволяет определить время достижения некоторой заданной концентрации реагирующего вещества (продукта реакции).

Система кинетических уравнений в дифференциальной форме запишется следующим образом [18]:

$$D(t, C) = \begin{cases} -kC_{CO}C_{O_2}, \\ -\frac{p}{q}kC_{CO}C_{O_2}, \end{cases} \quad (1)$$

где C_{CO} , C_{O_2} – начальные концентрации газов; k – константа скорости реакции; p – порядок химической реакции; q – стехиометрический коэффициент. Температурную зависимость константы скорости довольно точно описывает уравнение Аррениуса:

$$k(T) = Ae^{-\frac{E_A}{RT}}, \quad (2)$$

здесь $R=8,3114$ Дж/(моль·К) – универсальная постоянная газовая; $T=700$ °С (973,1 К) – температура реакции; A – предэкспоненциальный множитель; E_A – энергия активации.

Учитывая необходимые величины [18]: $E_A=200$ Дж/моль, $A=2,5 \cdot 10^{12}$ см³/(моль·с), при $T=1500$ –3000 К, вычислим константу скорости реакции окисления окиси углерода:

$$k(T)=46,0269 \text{ см}^3/(\text{моль} \cdot \text{с}).$$

Важно заметить, что приведенные значения E_A и A используются в расчетах правомерно, не взирая на то, что температура T исследуемой реакции меньше 1500 К. Дело в том, что при использовании карбида титана в фильтроэлементе в качестве катализатора полное окисление СО наблюдается при температуре, приблизительно втрое меньшей необходимой для совершения реакции без использования катализатора [15]. Следовательно, данные характеристики реакции можем использовать в интервале температур 500–1000 К.

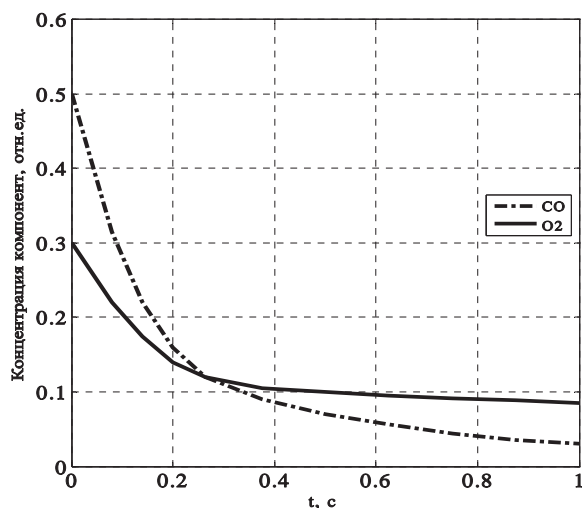


Рис. 2. Изменение концентраций компонент CO и O₂ с течением времени

Fig. 2. Change in concentrations of CO and O₂ components over time

На графике (рис. 2) изображена зависимость концентраций реагентов от времени протекания химической реакции, где f_1 – концентрация окиси углерода, f_2 – концентрация кислорода, t – время протекания реакции. Время окисления окиси углерода кислородом $t=0,265$ с, что подтверждает согласованность полученного результата с результатами проводимых экспериментов [18].

II. Расчет коэффициентов для проведения численного эксперимента

Для нахождения численного решения поставленной задачи необходимо вычислить все неизвестные коэффициенты, фигурирующие в математической модели неизоотермического процесса фильтрации бинарных газовых смесей:

тической модели неизоотермического процесса фильтрации бинарных газовых смесей:

$$\frac{J_1}{D_{12}} + \frac{J_2}{D_{21}} = - \left[1 + \frac{pB_0}{\eta Dk} \right] \frac{1}{k_B T} \frac{\partial p}{\partial z} - [n_1 \alpha_{1i} + n_2 \alpha_{2i}] \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (3)$$

с граничными условиями:

$$p_0 = p_0^0, \quad p_1 = p_1^0, \quad T_0 = T_0^0, \quad T_1 = T_1^0, \quad (4)$$

где J_1, J_2 – поток компонент; D^{12}, D^{21} – коэффициенты взаимной диффузии; B^0 – параметр вязкого течения; p – давление; η – вязкость смеси;

$\frac{1}{Dk} \equiv \frac{x_1}{D_{1k}} + \frac{2}{D_{2k}}$, x_1 – мольная первая компоненты;

D_{1k}, D_{2k} – коэффициенты кнудсеновской диффузии; k_B – коэффициент Больцмана; n_1, n_2 – концентрации компонент; α_{1i}, α_{2i} – поправочные термодиффузионные коэффициенты. При $J_1=J_2=0$ получаем стационарный перепад давления.

Коэффициент кнудсеновской диффузии D_{ik} пропорционален средней скорости молекул \bar{v} . Принято выделять эту пропорциональность в явном виде, вводя безразмерный параметр кнудсеновского течения K_0 . Для длинной цилиндрической трубы радиусом r и диффузионного закона отражения молекул от ее поверхности $K_0=r/2$ [10, 19, 20].

Коэффициенты взаимной диффузии вычисляются по формуле

$$D_{i,j} = 10^{-16} \left(\frac{1}{\mu_i} + \frac{1}{\mu_j} \right)^{0,5} \frac{T^{1,5}}{P(d_i + d_j)} \quad (\text{м}^2 \cdot \text{Па}) / \text{с}. \quad (5)$$

Формула расчета коэффициента кнудсеновской диффузии:

$$D_{ik} = (4/3) K_0 \bar{v}_i = \frac{2r}{3} \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m_i}}, \quad (6)$$

где k_B – постоянная Больцмана, Дж/К; T – абсолютная температура газа, К; r – радиус поры, m_i – масса молекулы, кг.

Для нахождения коэффициента динамической вязкости η смеси газов может быть использована приближенная формула аддитивности:

$$\frac{\mu_{\text{смеси}}}{\eta_{\text{смеси}}} = \sum_i \frac{y_i \mu_i}{\eta_i}, \quad (7)$$

где y_i – объемная доля i -го компонента; μ_i – молярные массы i -й компоненты смеси; η_i – вязкость i -й компоненты смеси. Тогда для газовой смеси вязкость определяется по формуле

$$\eta_{\text{смеси}} = \frac{\mu_{\text{смеси}}}{\sum_i \frac{y_i \mu_i}{\eta_i}} = \frac{\rho_1}{\frac{m_1 \mu_1}{\eta_1 \rho_1} + \frac{m_2 \mu_2}{\eta_2 \rho_2}}. \quad (8)$$

$$\eta_{\text{смеси}} = 8,2909 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

III. Расчет скорости реакции и длины поры

Перепад давления, для пор фильтра из СВС материала, ΔP вычисляется по формуле:

$$\Delta P = \eta \frac{\rho v^2 L}{2D}, \quad (9)$$

где ρ – плотность газовой смеси, кг/м³; v – средняя скорость потока газовой смеси, м/с; η – вязкость смеси, Па·с; L – длина поры, м; D – диаметр поры, м.

Зная все значения, получим выражение для длины поры и вычислим ее рекомендуемое значение при $v=0,2763$ м/с:

$$L = \frac{2D\Delta P}{\eta \frac{(\sum_{i=1}^2 m_i)P}{(\sum_{i=1}^2 \frac{m_i}{\mu_i})RT} v^2}. \quad (10)$$

$$L = 0,1557 \text{ м.}$$

Необходимо отметить, что на практике истинная длина фильтроэлемента уменьшается по сравнению с длиной поры, т. к. пористое тело рассматривается как набор извилистых каналов в твердом теле.

Для реализации поставленной задачи вычислены все необходимые коэффициенты, фигурирую-

щие в разработанной математической модели неизоэтермического процесса фильтрации бинарных газовых смесей (3). Дальнейшее исследование предполагает составление уравнения (3) в конечных разностях и его численную реализацию.

Выводы

1. Данный подход позволяет оценить время химических реакций окисления окиси углерода и азота и других компонент, входящих в состав газовой смеси. На основе анализа численного эксперимента могут быть получены геометрические размеры фильтроэлементов (длина и диаметр пор) и рассмотрена возможность решения обратной задачи процесса фильтрации многокомпонентных газовых смесей.
2. На основе математических моделей, предложенных в [10, 21], адаптирована математическая модель (подобраны поправочные термодиффузионные коэффициенты при изотермическом переносе через капилляр изотермического газа) фильтрации двухкомпонентной газовой смеси в неизоэтермических условиях.
3. Дальнейшее исследование предполагает составление разностной схемы для проведения численного эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евстигнеев В.В. Математическая модель фильтрования цилиндрической поверхности СВС-фильтра // Ползуновский вестник. – 2004. – № 4. – С. 205–210.
2. Nishanth Dongari, Amit Agrawal. Modeling of Navier–Stokes equations for high Knudsen number gas flows // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2012. – V. 55. – Iss. 15–16. – P. 4352–4358.
3. Pratibha Pandey, Chauhan R.S. Membranes for gas separation // Progress in Polymer Science. – 2001. – V. 26. – № 6. – P. 853–893.
4. Mathematical modeling of a novel tubular micro-solid oxide fuel cell and experimental validation / Saeid Amiri, R.E. Hayes, K. Nandakumar, Partha Sarkar // Chemical Engineering Science. – 2010. – V. 65. – № 22. – P. 6001–6013.
5. Peng Dai, Dennis Jh.S., Scott S.A. Using an experimentally-determined model of the evolution of pore structure for the gasification of chars by CO₂ // Fuel. – 2016. – V. 171. – P. 29–43.
6. Понамарёв А.И., Зарипова К.Р. Численное моделирование неизоэтермической нестационарной фильтрации для различных постановок задач // Нефтегазовое дело. – 2013. – № 3. – С. 228–262.
7. Глазов С.В. Фильтрационное горение углеродсодержащих систем в противотоке: дис. ... д-ра. физ.-мат. наук. – Черноголовка, 2012. – 424 с.
8. Афанасьев А.А. Термогидродинамика бинарной смеси в пористой среде // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4 (5). – С. 1978–1980.
9. Лаевский Ю.М., Якушева Л.В. Численное моделирование фильтрационного горения газа на основе двухуровневых полуневяных разностных схем // Вычислительные технологии. – 2007. – Т. 12. – № 2. – С. 90–103.
10. Мейсон Э., Малинаускас А. Перенос в пористых средах: модель запыленного газа / пер. с англ. В.И. Ролдугина; под ред. С.П. Баканова. М.: Мир, 1986. – 200 с.
11. Suresh K. Bhatia, Nicholson D. Some pitfalls in the use of the Knudsen equation in modeling diffusion in nanoporous materials // Chemical Engineering Science. – 2011. – V. 66. – Iss. 3. – P. 284–293.
12. Вольнов А.С., Третьяк Л.Н. О системном подходе к оценке влияния автотранспортных средств в процессе эксплуатации на экологию городов // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2014. – № 1. – С. 161.
13. Новоселов А.Л., Павлов С.Н., Жуйкова А.А. Эффективность применения пористых проницаемых СВС-каталитических блоков в нейтрализаторах // Повышение экологической безопасности автотракторной техники: сб. статей. – Барнаул, 2006. – С. 47–56.
14. Григорян Э.А., Мержанов А.Г. Катализаторы XXI века // НАУКА – ПРОИЗВОДСТВУ. – 1998. – № 3 (5). – С. 30–41.
15. Мержанов А.Г. Концепция развития СВС как область научнотехнического прогресса. – Черноголовка: Изд-во «Территория», 2003. – 368 с.
16. Computational solutions for non-isothermal, nonlinear magnetoconvection in porous media with hall/ionslip currents and ohmic dissipation / O. Anwar Bég, S. Abdul Gaffar, V. Ramachandra Prasad, M.J. Uddin // Engineering Science and Technology. – 2016. – V. 19. – № 1. – P. 377–394.
17. Использование СВС-технологии для получения пористых проницаемых блоков каталитических нейтрализаторов / Д.С. Печенникова, А.А. Жуйкова, А.А. Новоселов, А.В. Унгефук // Ползуновский альманах. – 2011. – № 2. – С. 136–138.
18. Горшков В.И., Кузнецов И.А. Основы физической химии. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 408 с.
19. Justifying the significance of Knudsen diffusion in solid oxide fuel cells / Fei Yang, Jianmin Gu, Luhan Ye, Zuoxiang Zhang, Gaofeng Rao, Yachun Liang, Kechun Wen, Jiyun Zhao, Jh.B. Godenough, Weidong He // Energy. – 2016. – V. 95. – P. 242–246.
20. Evans K.W. The simulations of tubular solid oxide fuel cells (SOFCs) // Chemical Engineering Journal. – 2011. – Iss. 168. – P. 1301–1310.
21. Семенов Б.В. Математическое моделирование процессов течения двухкомпонентной смеси через пористую структуру // Вестник кибернетики. – 2012. – № 11. – С. 98–102.

Поступила 09.03.2016 г.

Информация об авторах

Семенов Б.В., кандидат технических наук, доцент кафедры кибернетических систем Института геологии и нефтегазодобычи Тюменского индустриального университета.

Шумкина М.В., магистрант кафедры кибернетических систем Института геологии и нефтегазодобычи Тюменского индустриального университета.

Лапик Н.В., старший преподаватель кафедры кибернетических систем Института геологии и нефтегазодобычи Тюменского индустриального университета.

Попова Н.В., старший преподаватель кафедры кибернетических систем Института геологии и нефтегазодобычи Тюменского индустриального университета.

UDK 519.711.2

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF NON-ISOTHERMAL FILTRATION FLOWS OF BINARY GAS MIXTURE

Boris V. Semenov¹,
semenov062@yandex.ru

Mariya V. Shumkina¹,
mashynya86rus@mail.ru

Natalya V. Lapik¹,
lnw2@yandex.ru

Nadezhda V. Popova¹,
kafedra5@yandex.ru

¹ Industrial University of Tyumen,
70, Melnikaite street, Tyumen, 625038, Russia.

Construction of mathematical models of flows of heterogeneous (multicomponent, multiphase) media requires an adequate description of transport processes. In traditional formulations of problems of natural and technogenic character processes, including the problems of atmospheric phenomena, modeling of process plants and biological systems, there is a need to take into account different features caused by the presence of impurity phase, especially with a sufficiently high concentration of impurity component. The volume of emissions from vehicles, affecting the state of the atmosphere, depends on the quality of the manufactured filtration systems and the effectiveness of their work, which explains the extreme necessity of studying neutralization of dangerous gas mixtures. The study of such systems affects the fundamental aspects of rheology and description of systems in the presence of large-scale (caused by the presence of the carrier medium) interparticle correlations.

The relevance of the work is caused by the need to solve one of the global environmental problems, in particular pollution of air by harmful emissions of vehicles. A special place in solving this problem goes to neutralization systems which allow reducing toxicity of vehicle exhaust gases, and thereby increasing its sustainability.

The object of study is the filtration of a binary gas mixture of exhaust gases in gasoline internal combustion engines in non-isothermal conditions through the filter element produced using self-propagating high-temperature synthesis on the basis of titanium carbide.

Research method: the microscopic (molecular-kinetic) approach to implementation of mathematical model of filtration of a two-component mixture through a porous matrix.

Results. The authors have proposed the mathematical model of filtration of a two-component gas mixture in non-isothermal conditions and obtained the length of the filter element, the gas-dynamic factors (Knudsen coefficients and mutual diffusion, viscosity) for model numerical implementation.

Key words:

Filtration of binary gas mixture, model, flow time of a chemical reaction, reactant concentration, activation energy, mixture component, Knudsen diffusion factor, self-propagating high-temperature synthesis.

REFERENCES

1. Evstigneev V.V. Mathematical model of filtration of SVS-filter cylindrical surface. *Polzunovskiy vestnik*, 2004, no. 4, pp. 205–210. In Rus.
2. Nishanth Dongari, Amit Agrawal. Modeling of Navier–Stokes equations for high Knudsen number gas flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, vol. 55, no. 15–16, pp. 4352–4358.
3. Pratibha Pandey, Chauhan R.S. Membranes for gas separation. *Progress in Polymer Science*, 2001, vol. 26, no. 6, pp. 853–893.
4. Saeid Amiri, Hayes R.E., Nandakumar K., Partha Sarkar. Mathematical modeling of a novel tubular micro-solid oxide fuel cell and experimental validation. *Chemical Engineering Science*, 2010, vol. 65, no. 22, pp. 6001–6013.
5. Peng Dai, Dennis Jh.S., Scott S.A. Using an experimentally-determined model of the evolution of pore structure for the gasification of chars by CO₂. *Fuel*, 2016, vol. 171, pp. 29–43.
6. Ponamarjov A.I., Zaripova K.R. Numerical simulation of nonstationary non-isothermal filtration for a variety of productions tasks. *Neftegazovoe delo*, 2013, no. 3, pp. 228–262.
7. Glazov S.V. *Filtratsionnoe gorenie uglerodsoderzhashchikh sistem v protivotoke*. Dis. Kand. nauk [Filtration combustion of carbon-containing systems in counter-current. Cand. Diss.]. Chernogolovka, 2012. 424 p.
8. Afanasyev A.A. Thermohydrodynamic of binary mixture in a porous medium. *Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod*, 2011, no. 4 (5), pp. 1978–1980. In Rus.
9. Laevsky Yu.M., Yakusheva L.V. Numerical simulation of filtration gas combustion on the basis of two-level semi-implicit difference schemes. *Vychislitel'nye tekhnologii*, 2007, vol. 12, no. 2, pp. 90–103. In Rus.
10. Meison E.H., Malinauskas A. *Perenos v poristykh sredakh: model zaplyennogo gaza* [Transfer in porous media: the dusty gas model]. Translated from English by V.I. Roldugin. Ed. by S.P. Bakanov. Moscow, Mir Publ., 1986. 200 p.
11. Suresh K. Bhatia, Nicholson D. Some pitfalls in the use of the Knudsen equation in modeling diffusion in nanoporous materials. *Chemical Engineering Science*, 2011, vol. 66, no. 3, pp. 284–293.
12. Volnov A.S., Tretyak L.N. O sistemnom podkhode k otsenke vliyaniya avtotransportnykh sredstv v protsesse ekspluatatsii na ekologiyu gorodov [A systematic approach to assessing the impact of

- motor vehicles in operation on ecology of cities]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, no. 1, pp. 161.
13. Novoselov A.L., Pavlov S.N., Zhuykova A.A. Effektivnost primeneniya poristykh pronitsaemykh SVS-kataliticheskikh blokov v neytralizatorakh [Efficiency of application of porous permeable SVS-blocks in catalytic converters]. *Povyshenie ekologicheskoy bezopasnosti avtotraktornoy tekhniki. Sbornik statey* [Increase of ecological safety of automotive engineering]. Barnaul, 2006. pp. 47–56.
 14. Grigoryan E.A., Merzhanov A.G. Katalizatory XXI veka [The catalysts of the XXI century]. *NAUKA – PROIZVODSTVU*, 1998, no. 3 (5), pp. 30–41.
 15. Merzhanov A.G. *Kontseptsiya razvitiya SVS kak oblast nauchno-tekhnicheskogo progressa* [The concept of development of SHS as a field of scientific and technical progress]. Chernogolovka, Territoriya Publ., 2003. 368 p.
 16. O. Anwar Bég, S. Abdul Gaffar, V. Ramachandra Prasad, Uddin M.J. Computational solutions for non-isothermal, nonlinear magneto-convection in porous media with hall/ion slip currents and ohmic dissipation. *Engineering Science and Technology*, 2016, vol. 19, no. 1, pp. 377–394.
 17. Pechennikova D.S., Zhuykova A.A., Novoselov A.A., Ungefuk A.V. Use of SHS technology for producing porous permeable blocks of catalytic converters. *Polzunovskiy almanah*, 2011, no. 2, pp. 136–138. In Rus.
 18. Gorshkov V.I., Kuznetsov I.A. *Osnovy fizicheskoy khimii* [Fundamentals of physical chemistry]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znany Publ., 2011. 408 p.
 19. Fei Yang, Jianmin Gu, Luhan Ye, Zuoxiang Zhang, Gaofeng Rao, Yachun Liang, Kechun Wen, Jiyun Zhao, Jh.B. Goodenough, Weidong He. Justifying the significance of Knudsen diffusion in solid oxide fuel cells. *Energy*, 2016, vol. 95, pp. 242–246.
 20. Evans K.W. The simulations of tubular solid oxide fuel cells (SOFCs). *Chemical Engineering Journal*, 2011, no. 168, pp. 1301–1310.
 21. Semenov B.V. Mathematical modeling of liquid mixture flow through a porous structure. *Vestnik kibernetiki*, 2012, no. 11, pp. 98–102. In Rus.

Received: 9 March 2016.

Information about the authors

Boris V. Semenov, Cand. Sc., associate professor, Industrial University of Tyumen.

Mariya V. Shumkina, graduate student, Industrial University of Tyumen.

Natalya V. Lapik, senior lector, Industrial University of Tyumen.

Nadezhda V. Popova, senior lector, Industrial University of Tyumen.

УДК 631.471

ИЕРАРХИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЧВ И ПЛАНИРОВАНИЕ МАСШТАБА ИССЛЕДОВАНИЯ

Захарченко Александр Викторович¹,
zakh@tpu.ru

Алексеев Валерий Иванович²,
v_alekseev@ugrasu.ru

Ипатова Дарья Витальевна¹,
ipatovadasha@gmail.com

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

² Югорский государственный университет,
Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16.

Актуальность. Неоднородность почв, как естественного происхождения, так возникшую под воздействием ходовых систем, необходимо соразмерять с масштабом исследования. Почвенный покров просеки санитарно-защитной зоны воздушной линии электропередачи рассматривается в качестве иерархической системы. В почвенном покрове присутствует как естественная неоднородность, так и деградированные антропогенные почвы. Учет деградированных земель – актуальная проблема.

Целью работы является установление иерархической структуры неоднородности почвенного покрова с помощью вейвлет-анализа и установление её взаимосвязи с размером почвенного индивидуума для определения масштаба исследования антропогенно-измененных дерново-подзолистых почв на малых дистанциях.

Методы исследования. Использован вейвлет-анализ на основе фазово-частотной характеристики, реализованный в пакете МАТЛАБ-7.1 функции гаусс-5 (sgau5). Вейвлет анализ последовательно сопоставляет колебательные циклы дискретной функции с циклом модельной. Модельный цикл последовательно меняет размер. В качестве дискретной функции использовано измерение мощности гумусового горизонта. Измерения мощности гумусового горизонта ($N=1826$) проведены на стенке траншеи длиной 67 м, пересекающей санитарно-защитную зону воздушной линии электропередачи 500 кВ. За основу определения размеров почвенного индивидуума взяты идеи Ф.И. Козловского с использованием Фурье-преобразования.

Результаты. Вейвлет анализ позволяет выявить иерархическую структуру неоднородности почвенного покрова санитарно-защитной зоны. Рассмотрена асимметрия фазово-частотной диаграммы почвенного покрова. Обоснован расчет линейных размеров почвенного индивидуума. Обоснованы и даны рекомендации определения масштабных эффектов при изучении антропогенных почв.

Выводы. При помощи вейвлет-анализа выявлена система иерархически вложенных циклов неоднородности почв, которые могут рассматриваться в качестве индивидуумов низших таксономических единиц почвенной классификации. Показана асимметрия фазово-частотной характеристики почвенной неоднородности. Установлено, что на разных уровнях иерархии частота встречаемости почвенных индивидуумов пропорциональна квадратному корню линейного размера. Определены зависимости между количеством циклов, размером и масштабом наблюдения. Обоснован расчет масштабной сетки наблюдения для изучения антропогенно-нарушенных почв санитарно-защитной зоны линейных объектов. При формировании сети мониторинговых наблюдений для типа дерново-подзолистых почв рекомендуется устанавливать расстояния между почвенными наблюдениями менее или равными размерам почвенного индивидуума – 450–500 м.

Ключевые слова:

Гумусовый горизонт, почвенный индивидуум, вейвлет, фазово-частотная, масштаб, иерархия, антропогенные почвы, проблема изменяющегося масштаба, МАUP, воздушная линия электропередачи 500 кВ.

Введение

Иерархическая концепция строения почв и почвенного покрова представляется этапом развития системного обобщения познаний об окружающей природе [1]. Современные математические методы и достижения в анализе изображений создают новые возможности для исследований в областях географии, биологии и почвоведения [2]. Вейвлет-анализ является примером такого метода, позволяющего изучать иерархическую структуру пространственно-временных циклов разнообразных процессов, сравнивая такие явления, как эрозия лессового плато в Китае и пятна на Солнце [3],

климатические циклы [4]. С его помощью возможен не только ретроспективный анализ закономерностей поведения переменной, но и прогноз её изменения в будущем [5].

Проблема иерархических уровней организации природных объектов не является чисто биологической или географической. Она присутствует во всех физических явлениях, имеющих пространственно-временную организацию. Например, в книге академика М.А. Маркова «О природе материи» через призму иерархичности рассматриваются основные энергетические уровни организации физического микромира [6].

В почвоведении проблема иерархической организации почвы широко обсуждалась в конце прошлого века, благодаря работам А.Д. Воронина, Б.Г. Розонова [7], Е.А. Дмитриева [8], Ф.И. Козловского и др. [9]. С тех времен существенно изменились представления о существовании проблемы, что создает необходимость соотносить современные знания свойств иерархических систем с характерными чертами неоднородности почвенного покрова.

За основу расчетов масштаба исследования взяты размеры почвенного индивидуума, который рассматривается Е.А. Дмитриевым [8] в качестве объекта почвенной классификации. Чем мельче таксономия классификации, тем меньше размеры выделяемого индивидуума, тем больше частота пунктов наблюдений. По его мнению, актуален вопрос соотношения этих размеров с неоднородностью почвенного покрова, так как исследований по этой проблеме проведено недостаточно для методически обоснованных рекомендаций. Он удивляется отсутствию должного внимания к этой проблеме.

Целью работы является установление иерархической структуры неоднородности почвенного покрова с помощью вейвлет-анализа и установление её взаимосвязи с размером почвенного индивидуума для определения масштаба исследования антропогенно-измененных дерново-подзолистых почв на малых дистанциях.

Изучение иерархической неоднородности почв направлено на её практическое использование, так как является методической основой для обобщения разномасштабных исследовательских работ при картографировании земель, подверженных воздействию разнообразных факторов, в том числе техногенных.

Иерархическая концепция в естествознании

Первое наиболее последовательное обоснование иерархической организации природы сделано в публикации «Концепция интегративных уровней и биология» [10], в которой автор указывает, что законы, описывающие свойства каждого уровня интеграции, уникальны и кардинально меняются при переходе с одного уровня на другой. Он не связывал эти уровни с пространственно-временными иерархическими системами, хотя проблема влияния масштаба исследования на его результаты известна с 30-х годов прошлого века. Иерархические природные системы и эффекты масштаба окончательно объединены Опеншоу и Тейлером в 1979 г. [11] в проблему изменяющегося масштаба (MAUP – Modifiable areal unit problem). Количество статей по темам «Иерархические системы» и «MAUP» ежегодно возрастает, в среднем на 12–13 % с 1980 по 2000 г. [12]. Концепция получила развитие в различных отраслях биологии, географии [13, 2]. Большинство классификаций природных объектов построено на иерархическом принципе.

Ю.Г. Пузаченко [14] подробно рассматривает теоретические и прикладные аспекты проблемы. Феномен пространственной иерархической организации ландшафта открыт русскими географами в 1950-х гг. и теперь, по его мнению, является основой всех ландшафтных исследований.

Оказывается, что в пространстве и во времени данные агрегированы, поэтому в зависимости от масштаба и произвольных границ разбивки пространства на части результаты расчетов будут зависеть от способа разбиения. Масштабный эффект – зависимость от способа разбиения пространства и математического ожидания (I рода), дисперсии (II рода), асимметрии распределения (III рода) [15]. При переходе из крупного масштаба на более мелкий масштаб искажается форма полигонов. Кроме того, показано, что длина периметра контура с изрезанной границей стремится к бесконечности при уменьшении мерки длины. В настоящее время коэффициент дробной мерности (фрактальной размерности) пространства используется для оценки изрезанности географических границ [14], колебания мощности почвенного горизонта [16].

Основываясь на анализе географических данных, Jianguo Wu, Harbin Li [1] заключают, что четвертым пространственным измерением является масштаб. По их мнению, устройство географического пространства может быть описано в трех координатах: логарифм пространства, логарифм времени и паттерн. Паттерн может содержать в себе выделенные группы, таксоны или масштаб пространственных исследований. По их мнению, всякое природное явление имеет свой внутренний или характеристический масштаб (intrinsic or characteristic scales), который может не соответствовать используемому масштабу наблюдения, что приводит к неверным выводам и вызывает недоверие к исходным материалам. Иерархические уровни географического пространства рассматриваются в первую очередь, как отражение иерархической организации рельефа, почв и геологических структур, антропогенных объектов. Почвенный покров, являясь частью географического пространства, также характеризуется этими тремя параметрами.

В этой концепции время связано с пространственным масштабом так, что процессы одного масштабного уровня являются основой для развития процессов вышележащего уровня. Важнейшим выводом является то, что каждому масштабному слою пространства (уровню пространственной иерархии) соответствует характерное время [1], что может быть отражено в виде Stommel diagram.

Вейвлет-анализ основан на фурье-анализе одномерных числовых рядов, которые могут быть представлены с помощью фурье-преобразования как наложенные друг на друга гармонические колебания. Волна, охватывающая всю последовательность, содержит в себе волны меньших разме-

ров, формирующих иерархическую колебательную систему. С помощью окон, последовательно изменяющих размер, осуществляется их спектральный анализ. Пространственные природные иерархические системы аналогичны по структуре временным. Вейвлет-анализ позволяет выявить закономерности изменения размеров колебательных систем между уровнями иерархий, рассматривая их разномасштабные элементы структуры циклов.

Иерархическая концепция в почвоведении

В почвоведении проблема иерархических уровней организации пространства широко обсуждается, однако она ограничивается лишь одним свойством – структурой почвы. Почвенный покров входит на правах компонента в географическую оболочку, тем самым подпадает под действие закономерностей проблемы МАУР [2].

В классическом учебнике морфологии почв Б.Г. Розанов [7], анализируя уровни организации структуры почвы, предложенные А.Д. Ворониным и др., обосновывает 8 уровней иерархической организации почв. Они являются важным обобщением, но наибольшего внимания заслуживают сформулированные им два общих тезиса: 1) познание свойств только одного иерархического уровня не достаточно для целостного понимания объекта; 2) процессы, протекающие на разных иерархических уровнях, различны в сути, а исследования требуют на каждом уровне своего методического решения.

Часто в качестве модели иерархической системы используется образ русской матрешки. Однако в обычном виде вложенные друг в друга матрешки представляют собой слои вещества (типа конкреции) и не являются иерархической системой. Чтобы получить иерархическую систему, необходимо в объеме самой крупной матрешки распределить объемы матрешек среднего размера, а матрешка среднего размера должна быть сложена из матрешек мелкого размера, как почвенные комочки. Разберем эти матрешки на элементы и перемешаем их. В результате получим четырехмерную иерархическую матрешку, в которой присутствуют три независимых направления и одно выделенное направление в виде паттерна – размер элемента.

Направление от меньшего к большему называется «выделенным» потому, что переход из одного размерного уровня в другой качественно изменяет свойства объектов и методы его изучения.

Аналогичным образом можно разделить комочки хорошо оструктуренной почвы на части – от сложных структурных агрегатов до элементарной почвенной частицы. Элементарные почвенные частицы, соединяясь, образуют иерархические этажи первичной, вторичной, третичной почвенной структуры, формируя ярус от элементарной почвенной частицы до морфологического элемента,

составляющий почвенный горизонт. Следующий известный иерархический ярус – почвенный покров – выстраивается от элементарного почвенного ареала до почвенного покрова континента.

Отмечено [10], что все структурные уровни организации почвы находятся в причинно-следственной связи между собой. Исходя из этой положения, Е.А. Дмитриев [8] указывает на причинно-следственное нарушение пространственного сопряжения между иерархическим ярусом элементов структуры почвы и ярусом элементов структуры почвенного покрова. Фактически утерян целый ярус горизонтально организованных структур, о котором сведения отрывочны и не увязаны в теорию почвообразования. Без учета этой неоднородности почвенных слоев и тел осуществляется переход от морфологии почвенного тела (разрез) к неоднородности почвенного покрова (полипедон) в виде серии разрезов. Он утверждает, что отсутствует теория, объясняющая формирование почв между иерархическим уровнем почвообразовательных процессов в локальном месте и почвообразованием масштаба элементарного почвенного ареала.

Другими словами, присутствует пространственный интервал масштабов, который не может быть изучен существующими методами. В этот интервал попадают радиально организованные структуры, формирующиеся на коротких дистанциях – от десятков сантиметров до десятков метров, представляющие разнообразные процессы, обуславливающие гетерогенность почв [17]. Структуры могут быть объединены в элементарные единицы, не делимые в некотором масштабном интервале, при условии неизменности методов наблюдения – в почвенные индивидуумы.

Почвенный индивидуум

Вопрос размера почвенного индивидуума имеет практический смысл, так как позволяет сопоставить вариации локальной пространственной неоднородности почвы с протяженностью элементарного почвенного ареала. Масштаб исследования определяет размер неоднородности, который можно выявить при опробовании почвенного покрова, а следовательно, допустимую область его неопределенности, которая принимается как пространственно однородная. Одно наблюдение характеризует всю эту область. Эта однородность условна, и она обосновывается при выборе параметров эксперимента, одним из которых является пространственный масштаб. В англоязычной литературе [1] для её описания используется термин из фотографии «grain» – зерно. Эти наименьшие размеры можно было бы принять за почвенный индивидуум, но существуют ещё другие условия его выделения.

В американской почвенной классификации используется аналогичный по смыслу термин «педон», представляющий половину цикла изменения мощности горизонтов. Если циклы меньше

2 м или непрерывны, то за педон принимается призма сечением 1 м^2 [18]. Некоторое множество различающихся педонов одной таксономической единицы образуют полипедон. Почвенный индивидуум, или полипедон (*SI* – soil individual), рассматривается как мысленная пространственная проекция на почвенный покров архетипа таксона классификации (тип, подтип). Полипедон может являться как реально существующим физическим телом, представленным серией сопряженных педонов, так и объединяющим образом схожих по строению объектов.

Сущность почвенного индивидуума – это его двойственность. С одной стороны, индивидуум представляет собой пространственно-минимальную циклически повторяющуюся единицу внутри элементарного почвенного ареала, которая обладает сходством типодиагностических свойств, и в этом смысле однородна. С другой стороны, индивидуум – это пространственно-максимальный размер цикла, включающий в себя максимальное возможное количество неоднородности свойств, присутствующей в почвенном покрове, что является причиной индивидуальности. Из этих рассуждений вытекают два подхода относительно определения размеров *SI*: от общего к частному и наоборот. В первом случае Е.А. Дмитриев [8] определяет его как наименьший объем, обладающий качествами типа почвы, во втором (Ф.И. Козловский [9]) – как максимальный пространственный цикл неоднородности свойств, включающий все возможные их вариации.

Вариант наименьшего объема предлагается реализовать использованием почвенной колонки сечением 1 дм^2 на глубину почвенного профиля. Такая колонка достаточна по размеру для диагностики почвы на уровне типа, но она может попасть в область, где гумусовый горизонт почти отсутствует, а рядом, на расстоянии 10 см, располагается колонка, где гумусовый горизонт уже имеет максимальные размеры (языковатая граница слоя). Таким образом, фиксируется множество индивидуумов, имеющих морфологические различия уровня вида, иногда подтипа почвы на протяженной стенке разреза.

Вариант максимального цикла основывается на том, что почвенный индивидуум должен максимально охватывать неоднородность почвенного покрова, свойственную данному классификационному таксону, которую можно оценить вероятностными методами на основе химических свойств почв, усреднением пространственно-распределенных случайных величин. По мнению Ф.И. Козловского [9], почвенный индивидуум – статистическое понятие, характеризующее пространственную вариабельность морфологически значимых свойств. Индивидуум не имеет точного местоположения в почвенном ареале и может быть определен только при сравнительном анализе неоднородно-

сти почвенного ареала. С этих позиций почвенный индивидуум всегда отличается от конкретного полипедона, используемого в качестве наименьшей неоднородности почв (цикла) в американской классификации почв [18]. Для определения пространственных циклов неоднородности почв предлагается использовать характеристическую функцию случайной величины. Характеристические функции могут быть получены с использованием автокорреляционной функции, которая оценивает пространственную согласованность свойств между группами точек наблюдения. Понимая иерархическую природу неоднородности почвенного покрова, он приходит к выводу о необходимости анализа циклических флуктуаций с использованием фурье-преобразования, которое рассматривается как сумма гармонических колебаний. Амплитуда характеризуется дисперсией, а частота отражает спектральную плотность пространственной флуктуации и связана с размерами периода. По его мнению, фурье-анализ позволяет выявить спектры частот, которые отражают характеристический масштаб, а сами периоды являются характеристическим размером почвенного индивидуума.

Развитие методики вычисления фурье-преобразований и упрощение алгоритма привело к появлению вейвлет-анализа [19, 20]. Произвольный спектр неоднородностей рассматривается в виде суммы составляющих циклов колебаний с разномасштабным периодом повторения. Как в классическом анализе, так и в современном виде используется окно изменяющегося размера, скользящее по изучаемой последовательности. Разложение кривой колебания характеристики производится по ортогональному базису, образованному сдвигами и кратномасштабными копиями вейвлет-функции [18]:

$$W(f(a,b)) = \langle f, \Psi_{ab} \rangle, \quad (1)$$

$$\Psi_{ab} = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{L-b}{a}\right), \quad (2)$$

где Ψ_{ab} – оконная вейвлет-функция, в которой a – масштабирующий параметр, b – параметр сдвига (лаг) пространства или времени, $1/\sqrt{a}$ – параметр нормировки вейвлет-функции, f – изучаемая функция типа $f=F(x)$, где x – расстояние на трансекте, W – множество разных функций (в дискретном случае матриц), соответствующих разной форме сигнала, а в нашем случае – циклов колебания свойств почв. Параметры a и b в формуле (2) задают размер окна. Изучаемая функция дискретна, но это не мешает реализации вейвлет-анализа.

Таким образом, вейвлет-анализ упрощает алгоритм определения размеров почвенного индивидуума, который ещё в конце прошлого века наметил Ф.И. Козловский [9] как анализ неоднородности почвенных свойств с использованием характеристической функции и фурье-преобразования.

Объекты и методы

Исследования проведены на просеке воздушной линии электропередачи сверхвысокого напряжения 500 кВ (ВЛ СВН), направленной с востока на запад. Возраст ВЛ СВН на момент проведения исследования – 13 лет. Земля под ВЛ СВН находится в санитарной зоне отчуждения шириной 60 м, проложенной в виде просеки, которая используется фермерами для проезда, выпаса домашней скотины и сенокосения. В одном створе проложены две ВЛ СВН: одна – в 1967 г., другая – в 1986 г. Место исследования географически располагается на восточном склоне Арчекасского кряжа. Район исследований относят к Мариинско-Ачинскому почвенному округу расчлененной лесостепи предгорий. Административная принадлежность – Ижморский район Кемеровской области.

На просеке по макросклону кряжа сверху вниз сменяются типичные черноземы, серые лесные, дерново-подзолистые почвы, в нижней части – слабообразованные дерновые почвы на супесчаном делювии. Изученные дерново-подзолистые почвы азональны и в виде полосы располагаются на пологой средней части склона Арчекасского кряжа. Просека ВЛ СВН от р. Алчедат поднимается по макросклону до водораздела. Она ориентирована с востока на запад. На просеке дерново-подзолистые почвы имеют морфологическую особенность в виде второго гумусового горизонта. Выглядит он, как серые пятна в нижней части элювиального горизонта. Морфологическое строение, химические и физические свойства этих почв достаточно подробно изучены [21].

Объектом исследования является слой гумусового горизонта (АУ) дерново-подзолистых почв. Просека ВЛ СВН используется для сенокосения и выпаса деревенского скота, поэтому подстилка отсутствует. Верхний слой, где располагаются корни растений, уплотнен, поэтому поверхность почвы при

измерениях мощности слоя отбивается с высокой точностью. Проблемы измерения возникают в местах расположения дерновин злаков, где измерения ведутся на срезе от плотной поверхности почвы.

Мощность гумусового слоя традиционно используется для изучения неоднородности почвенного покрова [16]. Выбор этого признака обусловлен тремя причинами: 1) граница между горизонтами АУ и Е1 контрастна, чувствительна к внешним воздействиям и определяется с достаточной точностью – менее 0,1–0,5 см; 2) флуктуации мощности отражают изменение запасов гумуса; 3) в классификации почв (2004) мощность горизонта отражает видовую принадлежность [22].

Варьирование случайной величины мощности слоя определяется природой самого объекта. Из-за языковатой нижней границы слоя показатель мощности АУ имеет высокую вариабельность. Верхняя граница изменяется незначительно относительно нижней. В результате на одной стенке разреза почва шириной 40 см может изменяться от маломощной до мощной

Трансекта, на которой измерялась мощность АУ, пересекает просеку перпендикулярно ВЛ СВН (рис. 1). Северная часть трансекты начинается в осиновом подросте 10-летнего возраста, а заканчивается в сосново-березовом лесу.

Трансекта пересекает просеку ВЛ СВН в области максимального провиса проводов (середина между опорами). Она пикетирована через 1 м. Нивелиром проведена гипсометрическая съемка рельефа поверхности. Профиль трансекты слабо выпуклый к центру просеки, максимальная отметка рельефа поверхности находится под центральным проводом ВЛ СВН, к краям рельеф постепенно понижается. Перепад в 0,5 м на 30 м (половина длины трансекты) практически незаметен глазу.

При строительстве и эксплуатации ВЛ СВН (500 кВ) почвы просеки подвергались воздействию

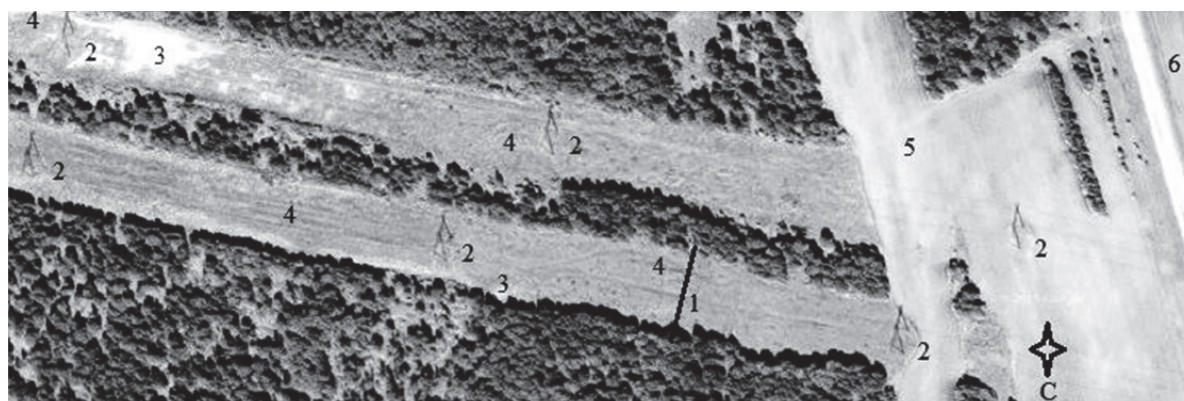


Рис. 1. Локализация трансекты на местности (снимок 2015 г. опубликован Google®). Условные обозначения: 1 – черной линией показано положение трансекты, 2 – опора ВЛ СВН 500 кВ, 3 – сильно нарушенные земли, 4 – следы, оставленные ходовыми системами тяжелой техники, 5 – пашня, 6 – дорога из Ижморки в Троицкое

Fig. 1. Localization of transects (space image was published in 2015 by Google®). Legend picture: 1 – the black line shows the position of the transect, 2 is the 500 kV transmission tower, 3 are the highly disturbed lands, 4 – tracks of undercarriage of heavy vehicles, 5 is the arable land, 6 is the road from Izhmorka to Troitskoe

агрегатов и ходовых систем тяжелой техники с формированием разной степени антропогенно-измененных почв [23]. На поверхности почв просеки наблюдаются колеи, пятна с отсутствием гумусового горизонта или его малой мощностью (абраземы) и насыпные слои грунта (стратоземы). Следы строительства сохраняются более 30 лет. Наибольшее их количество располагается вблизи опор ВЛ СВН, а также по центру и по краям просеки. Трансекта заложена в средней части между опорами, где антропогенно-нарушенных почв наименьшее количество. Дополнительную естественную неоднородность почв просеки вносит унаследованная парцеллярная структура леса.

Вдоль трансекты заложена траншея. На стенке траншеи проведены измерения мощности аккумулятивно-гумусового горизонта. Глубина траншеи составляет 0,6 м, а длина – 67 м. Ф.И. Козловским [9] показано, что всю неоднородность почвенного покрова можно оценить по одной траншее, если она достаточной длины. Предположим, A – минимальный размер цикла, B – максимальный размер цикла, тогда длина траншеи должна быть $6B$, а шаг измерения – $0,2A$. В нашем случае предлагается: $A=0,2$ м, $B=10$ м, следовательно, максимальный размер траншеи должен быть равен 60 м, а шаг измерения – 4 см.

Мощность горизонта измеряется в зависимости от её колебания в точках перегиба границы слоя. Расстояние между точками измерений является переменной величиной. Среднее расстояние между измерениями составляет 3,7 см. Замеры мощности

слоя АУ произведены с использованием металлической линейки. В результате сформирована дискретная функции зависимости мощности слоя (см) и расстояния (м) от начала траншеи, отображенная на рис. 2. В среднем шаг измерения получился дробным (3,75 см), что соответствует расчетным значениям (4 см).

Исследование функции колебания мощности слоя от расстояния проведено с использованием вейвлетов. Вейвлет-анализ и иерархический кластерный анализ дают схожие результаты по структуре итоговой диаграммы. Выбор вейвлет-анализа для обработки данных обусловлен тем, что в нем присутствует важный показатель – размеры циклов при разных уровнях детализации, отсутствующий в кластерном анализе. Циклы, различающиеся по знаку фазы, вложены друг в друга, что отражает устройство иерархических систем. Уровень детализации показывает относительное изменение пространственного масштаба отображения неоднородности мощности слоя. Эти важные качества вейвлет-анализа определяют его выбор, так как одной из задач работы является выявление соответствия между масштабom исследования и размером неоднородностей.

В анализе вейвлетов подбирается удобная форма функции (1), подходящая по форме изучаемому сигналу, которая одинаково успешно может использоваться как для анализа временных последовательностей, так и пространственных неоднородностей. В нашем случае использована гауссовская функция, имеющая вид колокола, отражающая по форме (морфологии) колебание мощности слоя.

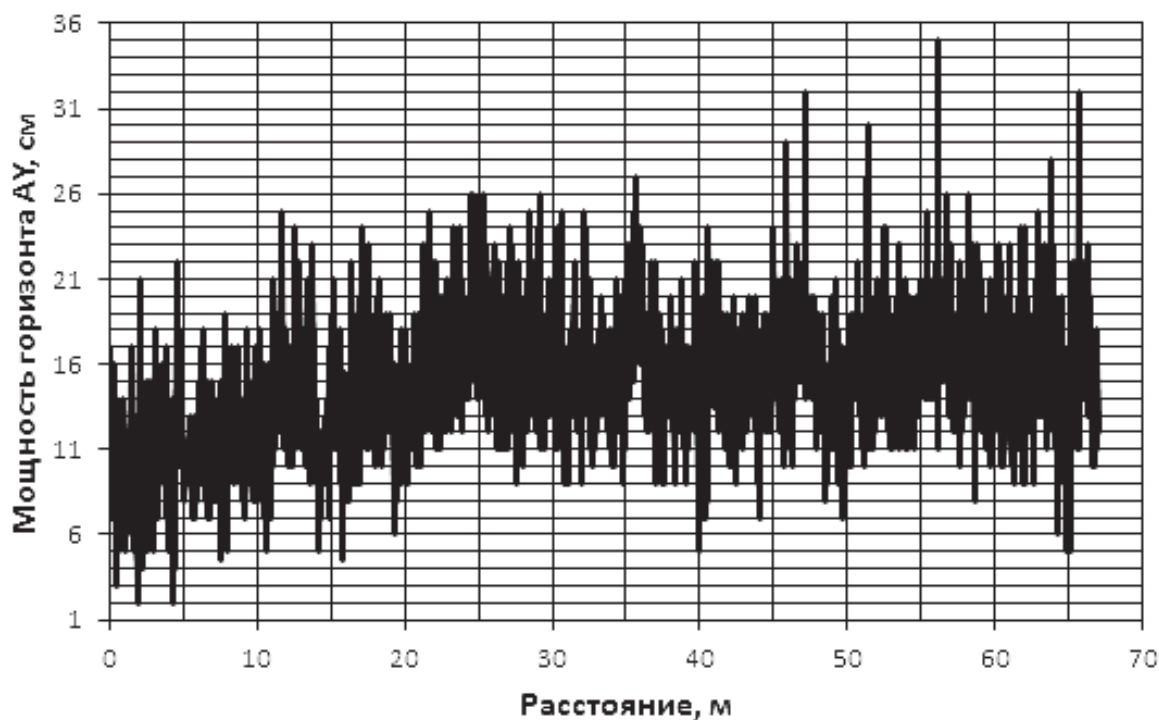


Рис. 2. Мощность АУ (см) трансекты

Fig. 2. Depth АУ (cm) of the transect

Обработка данных осуществляется с помощью вейвлет-анализа, реализованного в пакете МАТ-ЛАБ-7.1 на основе функции гаусс-5 (sgau5) [19]. В программе задается детализация, определяющая масштабный диапазон, в данном случае – 1000 единиц.

Оконная вейвлет-функция (2) скользит по изучаемой последовательности, при этом рассчитывается угол смещения от $+\pi$ до $-\pi$ между волной вейвлет-функции и волной изучаемой дискретной последовательности. При первой итерации в окно попадает вся последовательность целиком и сравнивается с генерируемой гауссовой модельной фигурой. Затем окно уменьшается в 2 раза (по умолчанию) и расчет запускается снова. Процесс заканчивается при шаге, равном минимальному интервалу исходной последовательности измерений (1 см). Минимальный масштаб пространства – это размер наименьшего языка слоя, максимальный – всей длины траншеи.

Масштабирующий параметр (a) в оконной функции задает изменение размерности окна. Каждое кратное увеличение оконной функции приводит к изменению относительного масштаба на единицу, что отражает уровень детализации. Чем больше выбран масштабный параметр, тем детальней будет прорисована фазово-частотная диаграмма и тем больше размер выходной матрицы.

Объем исходной матрицы составляет 1826 измерений. Общий размер равен объему исходной матрицы, умноженной на масштабный параметр

1000. Конечная выходная матрица содержит 1 826 000 значений угла смещения фазы колебаний характеристики ($\pm\pi$) через интервал, равный 0,01 м.

Дальнейшая обработка полученной матрицы фазово-частотной характеристики (ФЧХ) осуществляется с помощью Surfer 12. В результате получена эквипотенциальная трехмерная поверхность значения фазово-частотной характеристики в зависимости от уровня детализации и длины трансекты. Уровни детализации для дальнейшего анализа выбираются, исходя из формы полученной ФЧХ, примерно посередине между положениями ветвления (бифуркациями).

Результаты и обсуждение

Построена диаграмма фазово-частотной характеристики флуктуаций мощности слоя гумусового горизонта АУ (рис. 3) [4]. На диаграмме ФЧХ выделено 7 масштабных уровней, отмеченных между бифуркациями (точками разделения), приводящих к существенному увеличению деталей фазово-частотной диаграммы: 20, 40, 80, 150, 300, 440, 750. Линии выбраны таким образом, чтобы захватить максимальное количество циклов.

Линии, параллельные оси абсцисс, отражают изменение ФЧХ при разных масштабных параметрах (уровень детализации). Они проведены таким образом, чтобы захватить максимальное количество отрицательных и положительных фаз. По этим параметрам вейвлет-функции определяются сред-

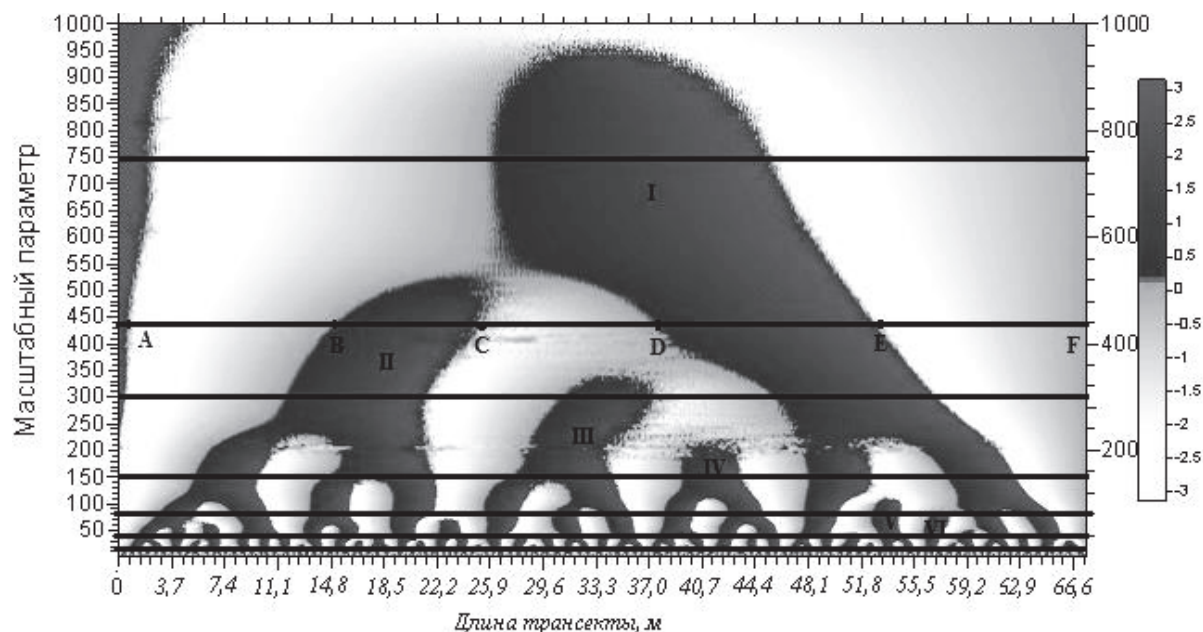


Рис. 3. Вейвлет-диаграмма фазово-частотной характеристики (от $-\pi$ до $+\pi$ рад) флуктуации мощности АУ (см): горизонтальными линиями показаны уровни детализации (1–1000); латинскими буквами А, В, С, D, E, F – точки измерения перехода фазы от плюса к минусу

Fig. 3. Wavelet diagram of phase-frequency description (from $-\pi$ to $+\pi$ rad.) of AY power fluctuations (cm): the horizontal lines show the levels of detail (1–1000), the Latin letters A, B, C, D, E, F show the measuring points of phase transition from plus to minus

ние значения ширины (м) отдельно для положительных и отрицательных фаз по данным расчетной матрицы ФЧХ. Размеры циклов измеряются отдельно для фаз < 0 и фаз > 0 . Например, уровню относительного масштабирования (детализации) 450 соответствуют точки O, A, B, C, D, E, F. Точки размечаются на результирующей матрице фазово-частотной характеристики. Отмечается в метрах длина цикла с одной фазой. Подсчитывается количество циклов отдельно для положительных и отрицательных фаз. Крайней правой границей цикла отрицательной фазы считается 67 м, крайней левой – 0. В расчет принимаются только целые циклы, так чтобы исключить краевой эффект, например от 0 до точки A, ведь истинные размеры цикла пока не определены.

На диаграмме ФЧХ положительные сдвиги по фазе (совпадающие с формой вейвлета) отображены черным цветом, и они соответствуют циклу относительного увеличения мощности слоя. Светло-серым цветом с градиентным оттенком изображены отрицательные сдвиги по фазе – снижение мощности АУ. Например, вейвлет оконной функции в виде гауссиана направлен в сторону увеличения значений, а мощность горизонта внутри окна снижается, тогда фазово-частотная характеристика будет отрицательная, а её значение соответствовать углу фазового смещения в радианах.

Фигура ФЧХ черного цвета отображена в виде «шляпы» от южной части просеки (слева) до северной (справа), что указывает на присутствие единого цикла увеличения мощности слоя на просеке. Она иерархически вложена в более крупную по размерам структуру с отрицательной фазой (мало-мощные дерново-подзолистые почвы).

Следует отметить элементы симметрии ФЧХ мощности слоя по всей длине трансекты. Элемент ФЧХ отрицательной фазы, охватывающий размеры от 19 по 47 м, состоит из двух элементов положительной фазы, в свою очередь состоящих из двух элементов отрицательной фазы. Диаграмма ФЧХ санитарно-защитной зоны достаточно симметрична относительно центрального провода ВЛ СВН.

Асимметрия вызвана преобладанием на диаграмме размеров положительной фазы в правой части зоны относительно левой. Размеры элементов внутри неё закономерно уменьшаются от центра к краям фигуры. Такое положение присутствует на более низких уровнях детализации. В левой части трансекты (от 0 до 26 м) наблюдается на единицу меньше иерархически вложенных уровней детализации по сравнению с правой частью – от 26 до 67 м.

Проекция центрального провода ВЛ СВН выпадает на центр фигуры – 33 м. Левая часть «шляпы» оказалась «разорванной» в районе крайнего провода ВЛ СВН (24–26 м). Этот разрыв вызван уплотнением почв на грунтовой дороге, которая используется местными фермерами для проезда.

Грунтовая дорога существует со времени строительства ВЛ СВН. Почва на ней уплотнена слева между центральным и крайним проводами, поэтому распад темно-серого колокола фазово-частотной функции обусловлен присутствием здесь антропогенно-нарушенных почв с преобладанием на диаграмме областей с отрицательным смещением фазы колебания (светло-серые градиентные тона). Левая часть просеки сложена относительно однородными по мощности гумусового горизонта почвами, на правой наблюдаются ярко выраженные циклы.

На уровне масштабных параметров 200–250 и 400–440 наблюдаются искажения формы деталей изображения фазово-частотных характеристик в виде горизонтальных полос, создающих неровный слоистый рисунок с внедрением отрицательных фаз в область положительных её значений и положительных фаз в область отрицательных значений. Полосы размывают границы изображения положительных фаз. Предполагается, что их появление обусловлено присутствием антропогенно-измененных почв, образовавшихся во время строительства ВЛ СВН, и сейчас эти природные участки находятся в стадии восстановления, но естественные циклы колебания мощности слоя искажаются. Ниже масштабного параметра 150 все детали прорисованы четко, так что на этом иерархическом уровне антропогенное воздействие не выявляется. Размеры пятен меньше размеров навесных агрегатов бульдозеров, используемых при строительстве ВЛ СВН, но они создают свои циклы, которые проявляются на этих уровнях детализации. Флуктуации мощности АУ внутри пятен нарушенных почв происходят по тем же естественным законам, что и на ненарушенных участках, только мощность непропорционально снижена.

Фазово-частотная характеристика мощности слоя имеет внутренние закономерности, которые могут быть использованы для вычисления характеристических размеров неоднородностей почвенного покрова. Проблема поиска такого размера природных объектов, содержащего в себе во всей полноте изучаемые свойства, является общей для многих наук, занимающихся пространственно-временными исследованиями, особенно если за объекты исследования принимаются сложно устроенные природные тела [9, 2]. Концепция основывается на гипотезе, что структурная организация системы может быть определена как совокупность элементарных ячеек, обладающих всей полнотой неоднородности, которые могут быть тиражированы симметричным отображением на весь объект. Например, элементарную естественную ячейку делимости горной породы геологи называли фрустумом (от лат. *frustum* – кусок) и фрустумы имеют разный характеристический объем [24]. Соответствующие объемы изучаемых проб (масштаб) увеличиваются по геометрическому закону. Важной особенностью является то, что вероятное коли-

чество зерен фрустума изменяется в узких пределах. Педон аналогичен по смыслу фрустуму. Он представляет собой циклическое изменение в пространстве каких-либо типодиагностических свойств почв.

Усредненный период циклических неоднородностей можно принять за вероятный размер индивидуума в простроне и транслировать его свойства в полипедон. Почвенным индивидуумом можно считать всю «шляпу» фазово-частотной диаграммы положительной фазы на рис. 3, состоящую из циклов, вложенных один в другой. Циклы правой части просеки ВЛ СВН оказываются вложенными в циклы центра просеки на единицу большим числом этажей иерархии. Трансекта случайным образом оказалась в переходной полосе между дерново-подзолистыми и серыми лесными почвами, что формирует два цикла увеличения мощности слоя гумусового горизонта. Первый обусловлен преобладанием дерново-подзолистых почв с пониженной мощностью слоя, но с присутствием пятен второго гумусового горизонта в нижней части подзолистого. Второй цикл вызван возрастанием мощности слоя в связи с появлением в правой части трансекты почв, по морфологии близких к типу серых лесных, но с присутствием пятен подзолистого горизонта.

На основе фазово-частотной матрицы рассчитаны средние линейные длины циклов с одной фазой. При масштабном параметре 1000 условно выделено 2 цикла, хотя явно присутствует только один с положительной фазой, и его максимальный размер совпадает с длиной просеки (67 м). Масштабный параметр 750 имеет 3 цикла, но этого недостаточно для статистических расчетов дисперсии. Параметр 440 характеризуется повышенной дисперсией, что отражается в высоком значении доверительного интервала, но имеет 5 циклов, что достаточно для статистических расчетов.

Наблюдается линейная зависимость между длиной цикла и масштабным параметром $R^2=0,999$ при $p<0,05$:

$$Lc = 0,44 + 0,03Mp, \quad (3)$$

где Lc – средняя длина циклов (м); Mp – масштабный параметр.

Количество циклов в зависимости от масштабного параметра рассчитывается по формуле

$$N = 691Mp^{-0,78}. \quad (4)$$

С использованием формулы (3) рассчитаны значения Lc для масштабных параметров (1000, 10, 1), которые затруднительно определить, используя матрицу ФЧХ. При масштабном параметре 1000 отсутствуют целые циклы, а при масштабных параметрах 10 и 1 они очень короткие и их множество, что затрудняет измерения. Размеры циклов зависят от масштабного параметра, следовательно, и размеры SI тоже должны определяться масштабом наблюдений (уровнем иерархии) (табл. 1).

Таблица 1. Размеры (м) и количество циклов АУ (см), средняя длина цикла Lc (м), количество циклов N при разном параметре масштаба на основе вейвлет-анализа

Table 1. Dimensions (m) and the number of cycles AY (cm), the average length of the cycle (m), the number of cycles at different scale parameter based on wavelet analysis

| Детализация, Mp Detailing, Mp | Размеры циклов (м) с фазой Sizes of cycles (m) with phase | | Средняя длина цикла, м Average cycle length, m | Количество циклов Number of full cycles | Размеры почвенного индивидуума, м Length of soil individual SI, m |
|----------------------------------|--|------|---|--|--|
| | >0 | <0 | | | |
| 1000 | – | – | 30,7* | 1 | – |
| 750 | 23,0 | 22,1 | 22,7±1,1 | 3 | 41,0 |
| 440 | 13,8 | 12,4 | 13,2±2,2 | 5 | 18,2±0,9 |
| 300 | 10,1 | 8,7 | 9,4±1,4 | 8 | 6,6±0,1,1 |
| 150 | 4,6 | 5,8 | 5,2±0,6 | 13 | 2,92±0,44 |
| 80 | 2,7 | 2,7 | 2,7±0,4 | 25 | 0,82±0,1 |
| 40 | 2,0 | 1,4 | 1,7±0,2 | 39 | 0,28±0,04 |
| 20 | 1,3 | 0,8 | 1,0±0,09 | 65 | 0,11±0,01 |
| 10 | – | – | 0,7* | 115** | – |
| 1 | – | – | 0,5* | 691** | – |

Примечание: * – рассчитанные значения средней длины цикла по формуле 3, ** – по формуле 4.

Note: * – estimated values of the average cycle length by the formula 3, ** – by the formula 4.

Уровни детализации – это иерархически уложенные циклы колебаний мощности слоя. Циклы отрицательной и положительной фаз имеют близкие значения по длине, хотя их размеры положительной фазы больше или равны отрицательной, за исключением уровня детализации 150, где значение отрицательной фазы больше положительной. В силу того что исходные параметры ФЧХ относительны, размеры SI могут быть определены с уверенностью только при сравнении размеров циклов вышележащего уровня детализации с нижележащим. В этом случае происходит проецирование объектов с менее крупного на более крупный масштабный план, соответственно, переход с одного иерархического уровня на другой.

Индивидуум должен содержать в себе как положительную, так и отрицательную фазы (от $-\pi$ до $+\pi$), поэтому среднюю величину цикла надо увеличить вдвое ($2Lc$). Тогда длина SI должна быть равна удвоенной средней длине цикла вышележащего слоя, деленной на сокращенное в 2 раза количество циклов нижерасположенного уровня иерархии:

$$SI = \frac{4Lc_{i+1}}{N_i},$$

где SI – линейный размер почвенного индивидуума; Lc_{i+1} – длина среднего цикла предыдущего масштабного уровня ($i+1$); N_i – количество циклов текущего уровня; $i=1,2,\dots,n$ – порядковый номер масштабного параметра. Ранее мной в статье [25]

был проведен расчет с использованием средней величины цикла одного знака фазы, поэтому размеры индивидуума оказались существенно меньше. Полный размер индивидуума есть удвоенная величина циклов положительной и отрицательной фаз.

Следуя определению почвенного индивидуума, данному Ф.И. Козловским [9], предполагаем, что максимальный период цикла колебания мощности горизонта АУ является отражением размера индивидуума. Однако нет никакой уверенности, что траншея в 67 м вскрыла полный максимальный цикл. Требуется иное правило определения максимального размера SI .

Такой способ может быть реализован с использованием закономерности изменения размеров циклов (L_c) в зависимости от их количества (N) при уровнях детализации от 20 до 750. Затем вычисляем размер максимального цикла, положив $N=1$.

Основываясь на данных табл. 1, определена закономерность увеличения размеров циклов при уменьшении их количества:

$$SI = \frac{447}{N^2}. \quad (4)$$

Исходя из формулы (4), если принять $N=1$, то получим искомый максимальный размер почвенного индивидуума, равный 447 м. Точность такого расчета не высока, так как определяется по 7 значениям уровней детализации (20–750), поэтому округлим до 450 м.

Для определения характеристического масштаба сопоставим размеры в натуре с расчетными значениями. Размер SI (450 м) при масштабе 1:2000 будет иметь размер отображения 250 мм, что уложится на стандартный лист бумаги. Используя эти пропорции и округляя до целых значений, получен весь набор масштабов неоднородности почвенного покрова индивидуумов низшего иерархического ранга (табл. 2).

Следуя представлениям Ф.И. Козловского [9], за размер почвенного индивидуума принимается размер, на котором реализуются все возможные присутствующие циклы изменения типа диагностических свойств таксономического уровня, а за линейный размер индивидуума принимается максимальный цикл (450 м). Масштаб 1:2000 позволяет изучить наиболее крупные неоднородности внутри элементарного почвенного ареала, что доказывает его целостность и определяет границы, отделяющие от других ареалов или непочвенных объектов.

Внутри типового индивидуума различаются множества групп, тяготеющих к той или иной таксономической категории (по Е.А. Дмитриеву [8] – педопопуляции), построенных на принципах иерархической системы. В этом случае получается структура иерархически соподчиненных индивидуумов, имеющих свой характеристический масштаб и свой линейный размер.

Таблица 2. Количество индивидуумов (N) в иерархии на единице площади, их расчетные размеры (SI) и масштаб исследования

Table 2. The number of individuals (N) in the hierarchy to a unit area, their estimated size (SI) and research scale

| N | $\sim SI, \text{ м}$ | Масштаб исследования 1: SI Scale research 1: SI |
|------|----------------------|--|
| 1,0 | 450 | 2 000 |
| 1,6 | 200 | 800 |
| 2,9 | 50 | 250 |
| 5,0 | 18 | 80 |
| 8,0 | 7 | 35 |
| 13,0 | 3 | 15 |
| 25,0 | 0,7 | 3 |
| 39,0 | 0,3 | 2 |
| 65,0 | 0,1 | 0,5 (2:1) |

По мнению В.П. Самсоновой [16], которая основывается на частотах распределения мощности гумусового горизонта, границы раздела внутри вида не достаточно точно обозначены. Кроме того, может быть, между подтипом и видом следует выделять дополнительные таксономические разделы, для которых характеристические линейные размеры индивидуума будут равны 200 м, 50 м или даже меньше. Кроме того, возможно включение в таксон «род» почвенных объектов радиальной направленности и объектов с её отсутствием. Следует исходить из того, что типизация объектов радиальной направленности имеет соподчиненное положение относительно профильной типизации.

Важным обобщением полученных закономерностей является зависимость, связывающая линейные размеры почвенного индивидуума и его частоту встречаемости. Если $f=1/N$ принять за частоту встречаемости индивидуумов, то из соотношения (4) вытекает важное свойство:

$$f = kSI^{1/2},$$

где k – константа, отражающая максимальный размер почвенного индивидуума. Частота встречаемости почвенных индивидуумов (f) пропорциональна квадратному корню его длины (SI).

Наименьший линейный размер неоднородности почвенного покрова в табл. 2 составляет 10 см при масштабе выявления 2:1. Установлено, что языки АУ в той или иной степени приурочены к вертикальным трещинам и границы соседних слоев коррелированы [26]. Ширина языка изменяется от 3 до 12 см. По-видимому, минимальный размер почвенной неоднородности 0,1 м обусловлен шириной языка границы слоя гумусового горизонта, циклично повторяющегося в пространстве. В морфологии Б.Г. Розанова [7] достаточно подробно характеризуется форма языков почвенных горизонтов, что может быть использовано для таксономического разделения. Возможно, выделение дополнительных таксонов почвенной классификации внутри подтипа позволило бы обрести утраченный,

по Е.А. Дмитриеву [8], иерархический интервал почвенной неоднородности между морфологическими структурами почвенного описания и структурами элементарного почвенного ареала.

Кроме траншеи для измерения мощностей гумусового горизонта заложена другая траншея – длиной 30 м от крайнего провода ВЛ СВН до сосны, расположенной на краю леса, на которой изучалась естественная неоднородность, являющаяся причиной колебания мощности изученного слоя. На этой траншее заложены горизонтальный срез шириной 0,5 м, вскрывающий вертикальную трещинную сеть элювиального горизонта дерново-подзолистой почвы.

Предварительные результаты опубликованы в [27]. Горизонтальный срез выявил неоднородность почв в виде трещинной сети при интервале изменения средней площади ячеек на квадратном метре от 291 до 594 см². Предполагая, что форма ячеек близка к квадрату, получаем линейные размеры минимальных циклов – от 17 до 24 см. Они близки к циклам, рассчитанным на основе ФЧХ вейвлет-анализа, размером 0,3 м при масштабе исследования 1:2. Это минимальная дискретность, но педонем её назвать нельзя, так как она меньше установленных в классификации размеров [18].

Проведенное сравнение площади ячеек трещинной сети в подкромовом пространстве крупной сосны в лесу и в отдельных местах на просеке под ВЛ СВН показывает, что в том и другом случае наблюдается существенное увеличение площади ячеек. При дополнительном обследовании мест с большой мощностью ячеек обнаружены отщипки коры сосны и древесины. Следовательно, места произрастания сосен остаются в почвенном покрове под ВЛ СВН и выявляются через 13 лет после её строительства в виде участков с наименьшей площадью ячеек трещинной сети. Воздействие древесной растительности на свойства почв формирует в пределах проекции кроны пространственно-локализованную неоднородность по морфологическим, физическим и другим свойствам [28–30]. В пределах проекции кроны дерева располагается корневая система, которая перегнивает в условиях просеки ВЛ СВН, но места расположения корней могут влиять на мощность гумусового горизонта. Линейные размеры этих участков меньше проекции кроны и составляют 4–6 м. Они соответствуют выявленным с помощью вейвлет-анализа циклам порядка 7 м (табл. 2) с характеристическим масштабом 1:35.

Размеры антропогенных нарушений соответствуют размерам ходовых систем техники и навесным агрегатам бульдозеров, которые расчищают просеку во время её строительства и срезания кустов и поросли при эксплуатации ВЛ СВН.

Знание размеров неоднородности почвенного покрова можно использовать для предварительного планирования объема научно-исследовательской работы. Допустим, предполагается изучить

неоднородность почвенного покрова, образованную в результате воздействия корчевателей при строительстве ВЛ СВН, предварительно определив средние размеры пятен антропогенно-измененных почв (абраземы), возникших при раскорчевке. Они составляют 1,4–3,0 м в диаметре. Такие размеры неоднородности почв соответствуют уровню детализации 150 (см. табл. 1) с размером почвенного индивидуума 2,92 м. Основываясь на данных табл. 2, масштаб при планировании сети наблюдений, гарантированно захватывающий объект таких размеров, должен быть равным 1:15 (~М 1:20). Если неоднородность почвенного покрова возникла по причине действия бульдозера с шириной отвала 3,2 м, то масштаб сетки измерений следует взять 1:35 (~1:40).

Существует обратная задача – планирование точек отбора проб при подфакельных экологических исследованиях. Зная количество неоднородностей на единицу площади (N), из табл. 2 определяются интервалы наблюдений, соответствующие размерам SI , а для определения охвата исследуемой территории используется соответствующий масштаб, отражающий данный уровень неоднородности почвенного покрова. Рекомендуется для типа дерново-подзолистой почвы в условиях санитарно-защитной зоны линейные устанавливать максимальные размеры интервалов сети наблюдений не более 450–500 м.

Заключение

Проблема изменяющегося масштаба обоснована в 1979 г., и в последнее время тема получила бурное развитие. Географы в начале 21 века определили положение всякого природного феномена в географическом пространстве тремя параметрами: пространство (space), время (time), pattern. Это касается в полной мере почвенного покрова, как элемента географической оболочки.

Известно, что неоднородность почвенного покрова имеет сложную иерархическую структуру – от локального почвенного описания до почвенного покрова континента. Такое представление проблемы приводит к выводу, что в понятии «почвенный индивидуум» присутствует сложная иерархическая структура, которая может быть изучена с использованием вейвлет-анализа.

Показано, что с помощью вейвлет-анализа выявляются иерархически соподчиненные циклы неоднородности почвенного покрова на малых дистанциях. Установлено наличие 8 уровней иерархии неоднородности почвенного покрова, каждый из которых может иметь свой характеристический масштаб и, соответственно, почвенный индивидуум.

Установлено, что положительная фаза ФЧХ колебания мощности АУ просеки ВЛ СВН представляет по форме «шляпу» (не только в силу специфики выбранной гауссовской оконной вейвлет-функции), внутренние структуры которой обладают общей симметрией. Центр положительных зна-

чений угла смещения фазы располагается в середине просеки. Он является организующим началом для всех вложенных циклов, как на левой, так и на правой сторонах трансекты. Этот факт указывает на целостность почвенного покрова, как природного образования, на просеке в пределах санитарно-защитной зоны ВЛ СВН.

В деталях диаграммы ФЧХ наблюдается асимметрия, например, количество уровней детализации в северной части просеке меньше на единицу относительно южной части. Фигура отрицательной фазы от 19 по 47 м, состоящая из 3-х крупных частей, размеры циклов которой закономерно уменьшаются от центра к краям просеки, что отражает общую закономерность перехода типа дерново-подзолистых почв к серым лесным почвам.

Почвенные циклы неоднородности меньшего размера обусловлены парцеллярной структурой леса, которая унаследована почвами просеки, что обнаруживается с помощью вейвлет-анализа. Эти уровни иерархии неоднородности почвенного покрова на малых дистанциях должны иметь таксономическое определение в классификации почв. Для этих целей, возможно, следует вывести таксоны, учитывающие радиальные структуры строения почв.

Размеры антропогенных нарушений соответствуют размерам ходовых систем техники и навесным агрегатам бульдозеров, которые расчищают просеку во время её строительства и срезания кустов и поросли при эксплуатации ВЛСВН.

Выявлено, что наименьший размер неоднородности почвенного покрова составляет 10 см при масштабе выявления 2:1, что соответствует расстоянию между языками границы почвенного слоя

гумусового горизонта дерново-подзолистой почвы. Большая часть языков слоя обусловлена вертикальной трещинной сетью элювиального и переходного горизонтов почв, которая обуславливает циклическое колебание нижней границы слоя.

Показана возможность расчета максимального значения цикла неоднородности почвенного покрова, которую можно принять в качестве почвенного индивидуума (по Ф.И. Козловскому). На основе изученной протяженности разномасштабных циклов выявлено, что размер почвенного индивидуума обратно пропорционален квадрату количества циклов с множителем, равным 447. Размер почвенного индивидуума, соответствующий типовому таксону дерново-подзолистых почв, можно принять равным ~ 450 м, который рассматривается как максимальный размер, включающий все множество циклов колебаний мощности гумусового горизонта.

Размеры масштабной сетки наблюдений следует планировать, основываясь на предварительных натуральных измерениях длины неоднородностей почвенного покрова. Полученные значения циклов неоднородности почв сравниваются с табличными значениями средних размеров циклов, которые используются при планировании частоты сети наблюдений на малых дистанциях для учета деградации почв не только на землях санитарно-защитных зон линий электропередачи, но на землях других линейных сооружений.

Для типа дерново-подзолистых почв при формировании сети мониторинговых наблюдений рекомендуется устанавливать расстояние между почвенными наблюдениями менее или равным размерам почвенного индивидуума – 450–500 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wu J., Li H. Concepts of scale and scaling // *Scaling and Uncertainty Analysis in ecology*. – Netherlands: Springer, 2006. – P. 3–16. DOI: 10.1007/1-4020-4663-4_1.
2. Geopedology. An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies / J.A. Zinck, G. Metternicht, G. Bocco, H.F. del Valle. – Switzerland: Springer International publishing, 2016. 549 p. DOI: 10.1007/978-3-319-19159-1_1.
3. A wavelet analysis of the relationship between Loess Plateau erosion and sunspots / P. Gao, V. Geissen, A. Temme, C.J. Ritsema, X. Mu, F. Wang // *Geoderma*. – 2014. – V. 213. – P. 453–459. DOI:10.1016/j.geoderma.2013.08.028.
4. Lin Z.S., Bian W.L., You W.H. The wavelets and hierarchies of the climate system // *Meteorology and Atmospheric Physics*. – March 1996. – V. 61. – P. 19–26.
5. Алексеев В.И., Полищук Ю.М. Прогноз изменений температуры по палеоклиматическим данным и инструментальным измерениям на основе методов вейвлет-анализа и нечетких нейронных сетей // *Вестник Югорского государственного университета*. – 2013. – Вып. 3 (30). – С. 11–14.
6. Марков М.А. О природе материи. – М.: Изд-во Наука. 1976. – 216 с.
7. Розанов Б.Г. Морфология почв. – М.: Академический проект, 2004. – 431 с.
8. Дмитриев Е.А. Теоретические и методологические проблемы почвоведения. – М.: ГЕОС, 2001. – 374 с.
9. Козловский Ф.И. Теория и методы изучения почвенного покрова. М.: Геос, 2003. – 536 с.
10. Novikoff A. The concept of integrative levels and biology // *Science*. – 1945. – V. 101. – P. 209–215.
11. Openshaw S., Taylor P. A million or so correlation coefficients: three experiments on the modifiable areal unit problem // *Statistical Applications in the Spatial Sciences* / Ed. by N. Wrigley. – London: Sion, 1979. – P. 127–144.
12. Schneider D.C. The Rise of the Concept of Scale in Ecology // *BioScience*. – July 2001. – V. 51. – № 7. – P. 545–553. DOI: 10.1641/0006-3568(2001)051%5B0545:TROTCO%5D2.0.CO;2.
13. Тюрюканов А.Н., Федоров В.М. Н.В. Тимофеев-Ресовский: Биосферные раздумья. – М.: РАЕН, 1996. – 368 с.
14. Пузаченко Ю.Г. Глобальное биологическое разнообразие и его пространственно-временная изменчивость // *Современные глобальные изменения природной среды*. – М.: Научный мир, 2006. – Т. 2. – 696 с.
15. Рац М.В. Структурные модели в инженерной геологии. – М.: Недра, 1973. – 216 с.
16. Самсонова В.П. Пространственная изменчивость почвенных свойств. На примере дерново-подзолистых почв. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 160 с.

17. Хохлюк А.П. Гетероземы (специфические почвенные образования). – Владивосток: ДВО ПОД РАН, 2006. – 220 с.
18. Soil Survey Division Staff. 1993. Soil survey manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18. 188 p.
19. Дьяконов В., Абраменкова И. МАТЛАВ. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.
20. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. – М.: Мир, 2005. – 671 с.
21. Zakharchenko A.V., Zakharchenko N.V. Three-Dimensional Surface Morphometry of Soil Horizons in Field Studies // Eurasian Soil Science. – 2006. – V. 39. – № 2. – P. 134–140. DOI: 10.1134/S1064229306020037.
22. Классификация и диагностика почв России / Л.Л. Шишков, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. – Смоленск: Ойкумена, 2004. – 342 с.
23. Захарченко А.В. Естественное восстановление антропогенно-измененных почв // Вестник Томского государственного педагогического университета. – 2005. – № 7. – С. 115–122.
24. Выявление первичной кусковатости (фрустумации) горных пород с помощью лазерной ультразвуковой экоскопии, фотолюминесценции и ряда других методов изучения минерального вещества / М.Ю. Поваренных, В.А. Рассулов, В.Н. Иньков и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 6. – С. 223–232.
25. Захарченко А.В. Вейвлет анализ мощности аккумулятивно-гумусового слоя почвенного покрова под линией электропередачи // Properties of matter in the focus of attention of modern theoretical doctrines. The results of the LXXXVIII International Research and Practice Conference and II stage of the Championship in Technical sciences, Architecture and Construction. – London, August 28 – September 02, 2014. – London: IASHE, 2014. – P. 37–40. DOI: <http://dx.doi.org/10.18007/gisap:ess.v0i7.1091>.
26. Захарченко А.В. Пространственная сопряженность морфологических поверхностей почв // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2007. – № 300 (II). – С. 146–153.
27. Захарченко А.В. Характеристики трещинной сети в зависимости от экологических условий земель лесных и линий электропередачи // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 10. – С. 392–397.
28. Phillips J.D., Marion D.A. Biomechanical effects, lithological variations, and local pedodiversity in some forest soils of Arkansas // Geoderma. – 2005. – V. 124. – P. 73–89. DOI: 10.1016/j.geoderma.2004.04.004.
29. Soil mixing and genesis as affected by tree uprooting in three temperate forests / P. Šamonil, P. Daník, R.J. Schaetzl, I. Vašicková, M. Valtera // European Journal of Soil Science. – May 2015. – V. 66. – P. 589–603. DOI: 10.1111/ejss.12245.
30. Disturbances can control fine-scale pedodiversity in old-growth forests: is the soil evolution theory disturbed as well? / P. Šamonil, I. Vašicková, P. Danek, D. Janík, D. Adam // Biogeosciences. – 2014. – V. 11. – P. 5889–5905. DOI: 10.5194/bg-11-5889-2014.

Поступила 10.03.2016 г.

Информация об авторах

Захарченко А.В., доктор биологических наук, профессор кафедры общей геологии и землеустройства Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Алексеев В.И., доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Института систем управления и информационных технологий Югорского государственного университета.

Ипатова Д.В., студентка кафедры общей геологии и землеустройства Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 631.471

HIERARCHICAL CONCEPT OF SOIL HETEROGENEITY AND PLANNING THE SCALE OF INVESTIGATIONS

Alexandr V. Zakharchenko¹,

zakh@ptu.ru

Valeriy I. Alekseev²,

v_alekseev@ugrasu.ru

Darya V. Ipatova¹,

ipatovadasha@gmail.com

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

² Yugra State University,
16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russia.

Relevance. Soil heterogeneity, both natural and that occurred owing to undercarriages, should be proportionated to the scale of the study. The soil cover of the sanitary protection zone of a transmission line is considered as a hierarchical system. There is natural heterogeneity and anthropogenic degraded anthropogenic soils in the soil cover. The registration of degraded soils is the relevant issue.

The main aim of the study is to establish relation based on wavelet analysis between the hierarchical structure of soil cover and the size of soil individual to improve the taxonomic division and to determine the mapping scale of mechanically disturbed soils.

The methods used in the study. Calculations were carried using wavelet analysis based on phase-frequency characteristics realized in Matlab 7.1 package-based functions *gauss 5* (*cgau5*). Wavelet analysis compares sequentially oscillating cycles of a discrete function with the model cycle. Model cycle changes size consistently. Measurement of humus horizon depth was used as a discrete function. Humus horizon depth ($N=1826$) was measured on the wall of 67 m length trench, crossing the sanitary protection zone of a transmission line of 500 kV. The ideas of F. Kozlovskiy and Fourier analysis were taken as the base for determining the sizes of soil individual.

The results. Wavelet analysis allows us to identify the hierarchical structure of soil heterogeneity. The authors have considered the asymmetry of the phase-frequency diagram and proved the calculation of soil individual sizes; substantiated and gave recommendations to study scale-effect polypedons of anthropogenic soils.

Conclusion. The authors determined the system of hierarchical cycles of smaller sizes which can correspond to the individuals of lower taxonomic units, which were not defined in the existing soil classifications. The asymmetry phase-frequency characteristics of the soil heterogeneity was shown. It was ascertained that at different levels of hierarchy the frequency of occurrence of soil individuals is proportional to a square root of linear dimension. The authors determined the dependences of cycle amount on size and observation scale and proved the calculation of the observation scale grid to study anthropogenically disturbed soils of the sanitary protection zone. In the formation of a network of monitoring observations for the type of sod-podzolic soils it is recommended to set the distance between the observations of soil less than or equal to the size of the individual soil – 450–500 meters.

Key words:

Humus horizon, soil individual, wavelet, phase-frequency, scale, hierarchy, anthropogenic soils, modifiable areal unit problem, MAUP, 500 kilovolt transmission lines.

REFERENCES

1. Wu J., Li H. Concepts of scale and scaling. *Scaling and Uncertainty Analysis in ecology*. Netherlands, Springer, 2006. pp. 3–16. DOI: 10.1007/1-4020-4663-4_1.
2. Zinck J.A., Metternicht G., Bocco G., Del Valle H.F. *Geopedology. An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies*. Switzerland, Springer International publishing, 2016. 549 p. DOI: 10.1007/978-3-319-19159-1_1.
3. Gao P., Geissen V., Temme A., Ritsema C.J., Mu X., Wang F. A wavelet analysis of the relationship between Loess Plateau erosion and sunspots. *Geoderma*, 2014, vol. 213, pp. 453–459. DOI: 10.1016/j.geoderma.2013.08.028.
4. Lin Z.S., Bian W.L., You W.H. The wavelets and hierarchies of the climate system. *Meteorology and Atmospheric Physics*, March 1996, vol. 61, pp. 19–26.
5. Alekseev V.I. Analysis and forecasting of cyclic time ranges using wavelet neural network and unclear inference rules. *Bulletin of Ugra State University*, 2013, Iss. 3 (30), pp. 3–10. In Rus.
6. Markov M.A. *O prirode materii* [Matter nature]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 216 p.
7. Rozanov B.G. *Morfologiya pochv* [Soil morphology]. Moscow, Akademicheskij prospect Publ., 2004. 431 p.
8. Dmitriev E.A. *Teoreticheskie i metodologicheskie problemy pochvovedeniya* [Theoretical and methodological issues of soil science]. Moscow, GEOS Publ., 2001. 374 p.
9. Kozlovskiy F.I. *Teoriya i metody izycheniya pochvennogo pokrova* [Theory and methods of studying soil cover]. Moscow, GEOS Publ., 2003. 536 p.
10. Novikoff A. The concept of integrative levels and biology. *Science*, 1945, vol. 101, pp. 209–215.
11. Openshaw S., Taylor P. A million or so correlation coefficients: three experiments on the modifiable areal unit problem. *Statistical Applications in the Spatial Sciences*. Ed. by N. Wrigley. London, Slon, 1979. pp. 127–144.
12. Schneider D.C. The Rise of the Concept of Scale in Ecology. *Bio-Science*, July 2001, vol. 51, no. 7, pp. 545–553. DOI: 10.1641/0006-3568(2001)051%5B0545:TROTCO%5D2.0.CO;2.

13. Tyuryukanov A.N., Fedorov V.M. *N.V. Timofeev-Resovskiy: biosfernye razdumya* [N.V. Timofeev-Resovskiy: biospheric thinking]. Moscow, RAEN Publ., 1996. 368 p.
14. Puzachenko Yu.G. Globalnoe biologicheskoe raznoobrazie i ego prostranstvenno-vremennaya izmenchivost [Global biological variety and its space-time instability]. *Sovremennoe globalnoe izmenenie prirodnoy sredy* [Current global change of environment]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2006. Vol. 2, 696 p.
15. Rats M.V. *Strukturnye modeli v inzhenernoy geologii* [Structural models in engineering geology]. Moscow, Nedra Publ., 1973. 216 p.
16. Samsonova V.P. *Prostranstvennaya izmenchivost pochvennykh svoystv. Na primere derново-podzolistykh pochv* [Spatial instability of soil properties. By the example of sod-podzolic soils]. Moscow, LKI Publ., 2008. 160 p.
17. Hohlyuk A.P. *Geterozemny (spetsificheskie pochvennye obrazovaniya)* [Hetero-soils (specific soil formations)]. Vladivostok, DVO POD RAN Press, 2006. 220 p.
18. Soil Survey Staff, Supplement to Agr. Handbook 18, *Soil Survey manual*. Dept. Agr., U.S. Govt. Printing Office, Washington, 1962. 188 p.
19. Dyakonov V., Abramenkova I. *MATLAB. Obrabotka signalov i izobrazheniy. Spetsialny spravochnik* [MATLAB. Processing signals and images. Special reference book]. St-Petersburg, PITER Publ., 2002. 608 p.
20. Malla S. *Veyvlety v obrabotke signalov* [Wavelets in signal processing]. Moscow, Mir Publ., 2005. 671 p.
21. Zakharchenko A.V., Zakharchenko N.V. Three-Dimensional Surface Morphometry of Soil Horizons in Field Studies. *Eurasian Soil Science*, 2006, vol. 39, no. 2, pp. 134–140. DOI: 10.1134/S1064229306020037.
22. Shishkov L.L., Tonkonogov V.B., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* [Classification and diagnostics of soils in Russia]. Smolensk, Oykumena Publ., 2004. 342 p.
23. Zakharchenko A.V. Natural restoration of anthropogenic-changed soils. *Tomsk State Pedagogical Bulletin*, 2005, no. 7, pp. 115–122. In Rus.
24. Povarennykh M.Yu. Rassulov V.A., Inkov V.N. Determination of rock primary lumpiness by laser ultrasound echoscopy, photoluminescence and a number of other methods for studying minerals. *GIAB*, 2008, no. 6, pp. 223–232. In Rus.
25. Zakharchenko A.V. Wavelet analysis of depth accumulative humus layer soils for Transmission line. Properties of matter in the focus of attention of modern theoretical doctrines. *The results of the LXXXVIII International 5. Research and Practice Conference and II stage of the ChamSIOnship in Technical sciences, Architecture and Construction*. London, August 28 – September 02, 2014. London, IASHE, 2014. pp. 37–40.
26. Zakharchenko A.V. Spatial conjugation of soil morphological covers. *Tomsk State University Journal of Biology*, 2007, no. 10, pp. 146–153. In Rus.
27. Zakharchenko A.V. Characteristic of crack network depending on ecological conditions of grounds in forest and transmission lines. *International journal of applied and fundamental research*, 2015, no. 10, pp. 392–397. In Rus.
28. Phillips J.D., Marion D.A. Biomechanical effects, lithological variations, and local pedodiversity in some forest soils of Arkansas. *Geoderma*, 2005, vol. 124, pp. 73–89. DOI: 10.1016/j.geoderma.2004.04.004.
29. Šamonil P., Daník P., Schaetzl R. J., Vašicková I., Valtera M. Soil mixing and genesis as affected by tree uprooting in three temperate forests. *European Journal of Soil Science*, May 2015, vol. 66, pp. 589–603. DOI: 10.1111/ejss.12245.
30. Šamonil P., Vašicková I., Danek P., Janík D., Adam D. Disturbances can control fine-scale pedodiversity in old-growth forests: is the soil evolution theory disturbed as well? *Biogeosciences*, 2014, vol. 11, pp. 5889–5905. DOI: 10.5194/bg-11-5889-2014.

Received: 10 March 2016.

Information about the authors

Alexandr V. Zakharchenko, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Valeriy I. Alexeev, Dr. Sc., professor, Yugra State University.

Darya V. Ipatova, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

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 25.04.2016. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 19,08. Уч.-изд. л. 17,25.
Заказ 203-16. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ