



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

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

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 327, № 10, 2016

Издательство
Томского политехнического университета
2016

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

Редакционная коллегия

Дьяченко А.Н., гл. редактор, д-р техн. наук (Россия)
Рихванов Л.П., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Остальд 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)
Зиятдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)
Кириянова Л.Г., выпуск. редактор, канд. филос. наук (Россия)
Глазырин А.С., выпуск. редактор, канд. техн. наук (Россия)

Входит в Перечень ВАК РФ – ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Подписной индекс в объединённом каталоге
«Пресса России» – 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 (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

- Прогнозирование и разведка георесурсов
- Добыча георесурсов
- Транспортировка георесурсов
- Глубокая переработка георесурсов
- Энергоэффективное производство и преобразование энергии на основе георесурсов
- Безопасная утилизация георесурсов и вопросы геоэкологии
- 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

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

Volume 327, № 10, 2016

**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. (South Korea)
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 Communicationss).

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Моделирование качества руд при технологии с обрушением Голик В.И., Лукьянов В.Г., Комащенко В.И.	6	Modeling ore quality using ore caving technique Golik V.I., Lukyanov V.G., Komashchenko V.I.	
Обобщенное распределение площадей малых озер в криолитозоне Западной Сибири по космическим снимкам высокого разрешения Полищук Ю.М., Богданов А.Н., Муратов И.Н., Полищук В.Ю.	13	Generalized histogram of lake size-distribution in permafrost of Western Siberia based on satellite images of high resolution Polishchuk Yu.M., Bogdanov A.N., Muratov I.N., Polishchuk V.Yu.	
Экспериментальное исследование движения капель воды в водонефтяной эмульсии при разделении в неоднородном электрическом поле Зайковский В.В., Харламов С.Н., Муратов В.М.	22	Experimental study of water-in-oil emulsion destabilization in nonuniform electric field Zaykovskiy V.V., Kharlamov S.N., Muratov V.M.	
Детальная стратиграфия и динамика хасырея Центрального Ямала в верхнем голоцене Прейс Ю.И., Симонова Г.В., Слагода Е.А.	35	Detailed stratigraphy and dynamics of central Yamal khasyrey during the late Holocene Preis Yu.I., Simonova G.V., Slagoda E.A.	
Влияние ультразвука на структурно-механические свойства нефтей и процесс осадкообразования Ануфриев Р.В., Волкова Г.И.	50	Influence of ultrasonic treatment on structural-mechanical properties of oil and sedimentation Anufriev R.V., Volkova G.I.	
Районирование территории по степени опасности оседания земной поверхности при проектировании магистрального газопровода в Южной Якутии Строкова Л.А., Ермолаева А.В.	59	Zoning according to the hazard level of earth surface subsidence when designing the main gas pipeline in south Yakutia Strokova L.A., Ermolaeva A.V.	
Коммутационные испытания экспериментального вакуумного выключателя Лавринович В.А., Убиенных Б.И., Кладко А.А.	69	Switching tests of an experimental vacuum circuit breaker Lavrinovich V.A., Ubiennykh B.I., Kladko A.A.	
Коллекторы и флюидоупоры в отложениях венда и кембрия Предьенисейской субпровинции Тумашов И.В., Вараксина И.В.	78	Collectors and confining beds in deposits of the Vend and Cambrian at the Predyenisey oil-and-gas area (the southeast of West Siberia) Tumashov I.V., Varaksina I.V.	
Полевой шпат щелочно-гранитного комплекса Халдзан-Бурэгтэг (Западная Монголия): особенности структуры и химического состава Зенина К.С., Небера Т.С., Коноваленко С.И.	94	Feldspar of alkali-granite complex Khaldzan-Buregteg (Western Mongolia): features of structure and chemical composition Zenina K.S., Nebera T.S., Konovalenko S.I.	
Вынужденные колебания и контактное взаимодействие структуры, состоящей из двух параллельных пластин с внутренним набором локальных ребер, применяемой в теории гироскопов Яковлева Т.В., Крысько А.В., Кружилин В.С.	107	Constrained oscillations and contact interaction of the structure, consisting of two parallel plates with internal set of local ribs, used in the theory of gyroscopes Yakovleva T.V., Krysko A.V., Kruzhilin V.S.	
Оценка аэротехногенного загрязнения в окрестностях угольных и нефтяных котельных по состоянию снегового покрова (на примере Томской области) Таловская А.В., Язиков Е.Г., Шахова Т.С., Филимоненко Е.А.	116	Assessment of aerotechnogenic pollution: case study in the vicinity of coal-fired and oil-fired local boiler houses in Tomsk region Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Shakhova T.S., Filimonenko E.A.	

УДК 504.55.054:622(470.6)

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА РУД ПРИ ТЕХНОЛОГИИ С ОБРУШЕНИЕМ

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

Лукьянов Виктор Григорьевич³,
lukyanov@tpu.ru

Комащенко Виталий Иванович¹,
komashchenko@inbox.ru

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

² Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН,
РСО-Алания, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а.

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

Актуальность работы обусловлена необходимостью расширения области применения подэтажного обрушения с торцовым выпуском в связи с тенденцией конверсии горного производства на подземный способ, которая ограничивается высоким уровнем потерь и разубоживания руд.

Цель работы: обоснование технической возможности уменьшения потерь и разубоживания руд обрушаемыми породами при выпуске из камер путем оптимизации параметров системы разработки, как условия обеспечения рентабельности применяемой технологии.

Методы исследования: анализ передового опыта разработки аналогичных месторождений по материалам публикаций, физическое моделирование параметров очистной добычи и прогнозирование путей развития технологии.

Результаты. Изложены результаты исследования в натурных и лабораторных условиях. Показано, что эффективность технологии с обрушением снижается вследствие уменьшения размеров отбиваемых массивов. Подтверждена закономерная зависимость между параметрами выпуска руд и их качеством. Рекомендованы оптимальные параметры выемочных панелей. Определено, что наклон камеры под углом 80° улучшает показатели качества. При добыче руд вариантами с подэтажным обрушением с торцовым выпуском корректно увязаны параметры системы разработки: ширина и глубина фигуры выпуска и объем руды, выпущенный до начала разубоживания, что предоставляет возможность управления качеством добываемой руды. Основными факторами улучшения показателей извлечения являются увеличение высоты подэтажа и шахматное расположение выпускных отверстий при увеличенной до 25 м высоте выпускаемого слоя и расстояние между ортами 8 м.

Выводы. Извлечение руды из недр по схеме с шахматным расположением выпускных отверстий при увеличенной высоте выпускаемого слоя обеспечивает экономический эффект за счет сокращения объема нарезных работ, позволяет сократить число действующих очистных забоев за счет увеличения объема руды в отбиваемом слое, повысить концентрацию горных работ и загрузженность погрузочно-доставочной техники.

Ключевые слова:

Технология, разработка, месторождение, отбойка, выпуск, качество, слой, руда.

Введение

В настоящее время при добыче основного объема металлического сырья доминирует открытый способ разработки, с помощью которого добывается около 90 % железной руды России. Но когда глубина карьера становится критичной, переходят к шахтному методу или комбинируют открытый и подземный способы добычи. В России подземным способом добывается всего 8 % железной руды.

Среди систем разработки металлических месторождений получили распространение варианты с подэтажным обрушением. Подэтажное обрушение с торцовым выпуском руды нередко используют с дополнительным буровым горизонтом, располагаемым выше горизонта доставки. Образующий таким образом рудный массив обрушается с отставанием по отношению к обрушаемому массиву подэтажа.

Наряду с неоспоримыми достоинствами варианта: независимое ведение буровых и добычных работ, сокращение объема подготовительно-нарезных выработок при увеличенной высоте подэтажа, вариант характеризуется высокими показателями потерь и разубоживания [1, 2].

Вариант с торцовым выпуском руды с небольшой высотой применяют для выемки устойчивых руд, позволяющих проводить без крепления выработки сечением 10–12 м². Для него характерно совмещение горизонтов бурения, выпуска и доставки руды и возможность механизации подготовительных и добычных работ. Достоинства: высокая производительность и интенсивность выемки, сравнительно небольшой объем подготовительно-нарезных работ, конструктивная простота, высокая механизация работ. Недостатки: относительно высокие потери и разубоживание руды.

Вариант с фронтально-торцовым выпуском руды применяется для выемки залежей устойчивых руд. Улучшаются показатели извлечения, сокращается объем подготовительно-нарезных работ. Характерные недостатки: зависимость во времени между операциями бурения, взрывания, доставки, усложнение процесса погрузки из-за уменьшения коэффициента наполнения ковша погрузочно-доставочной машины при работе под углом к навалу породы.

Вариант системы подэтажного обрушения с отдельным буровым горизонтом и увеличенной высотой подэтажа, а также оставлением над буродоставочными ортами рудного «козырька» обеспечивает возможность независимого осуществления буровых и добычных работ, снижения объема горноподготовительных и нарезных работ, а также увеличения извлечения руды при ликвидации условий для потерь неотбитой руды [3].

Установление закономерностей взаимодействия технологических и природных условий применения варианта способствует расширению области применения этой прогрессивной технологии, поэтому исследования данного направления отличаются актуальностью [4].

Результаты и их обсуждение

Эффективность систем разработки с обрушением понижается за счет повышенных по сравнению с другими вариантами потерь и разубоживания. Эффективность варианта подэтажного обрушения с увеличенной высотой подэтажа определяется моделированием при масштабе 1: 50 [5].

Модель блока размещена в деревянном ящике размером 800×700×700 мм. Для удобства наблюдения две стенки модели застеклены. Для моделирования поведения руды использовали дробленую породу с размерами частиц до 5 мм. Мелкие частицы (до 0,2 мм) отсеивали во избежание сцепления между ними. Крупность налегающих пород была больше, чем руды (6–25 мм).

В модель руду засыпали слоями. Толщина первого слоя от почвы – 20 см, последующих – 10 см. Слои разделяли прослойками песка. Поверх пятого слоя руды засыпали пустую породу. После засыпки каждого 20-сантиметрового слоя устанавливались метки. Шаг выпуска составлял 2,5 м в натуре или 5 см в модели.

Руду удаляли совком, глубина внедрения которого не превышала 1,5 см, что соответствует 0,75 м в натуре. Выпускали руду дозами по 800–1100 г из пяти ортов, в последовательности 1, 3, 5, 2, 4. Выпуск заканчивали, когда разубоживание в дозе достигало 50 %. Максимальная толщина фигуры выпуска наблюдалась на высоте от почвы орта 20–30 см в модели или 10–15 м в натуре (рис. 1).

После этого рисовали фигуру выпуска и положение контакта руды и покрывающей породы. По вышедшим маркам отрисована площадь выпуска по каждому горизонту (рис. 2).

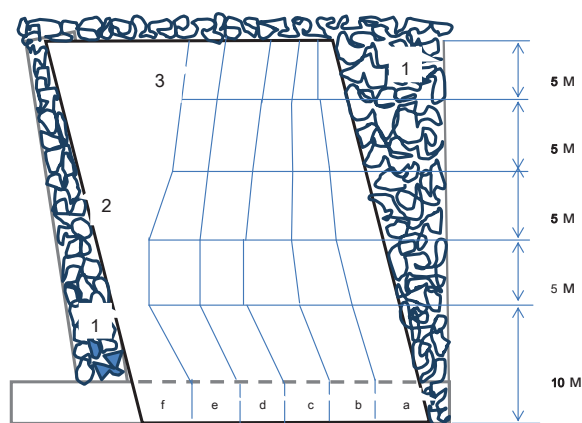


Рис. 1. Схема торцового выпуска руды: 1 – обрушенные породы; 2 – рудное тело; 3 – граница руды и породы после выпуска слоя; a–f – слои выпускаемой руды

Fig. 1. Scheme of ore front draw: 1 are the caved debris; 2 is the ore body; 3 is the border between ore and rock after bed draw; a–f are the beds of the drawn ore

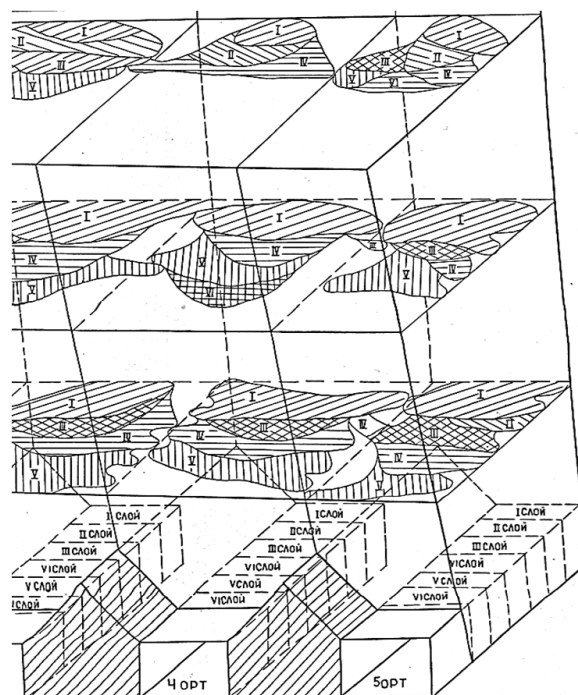


Рис. 2. Площадь слоев руды на горизонтах при выпуске из смежных ортов: I–VI – слои выпускаемой руды

Fig. 2. Area of ore beds on the horizons when drawing from adjacent cross gates: I–VI are the beds of the drawn ore

Анализ результатов моделирования обнаружил, что основную часть потерь составляет руда, не извлеченная с лежачего бока, а часть руды остается в «мертвой» зоне между выпускными выработками. Для уменьшения потерь руды в этой зоне рекомендовано располагать выпускные выработки так, чтобы фигуры выпуска, образующиеся при выпуске руды из соседних выработок, соприкасались.

Истечение руды носит неустойчивый струйный характер, на что указывает измененная форма по-

верхности фигур выпуска. Ширина фигуры выпуска в несколько раз превышает толщину. Поверхность фигуры деформирована из-за неодинаковой плотности сыпучего материала выпускаемого слоя.

Моделирование показателей выпуска при различной высоте слоя выполняется для трех серий выпуска.

Первая серия: выпуск из одиночной выработки. По выходу марок, заложенных в руду, изучались закономерности движения руды при торцовом выпуске и взаимосвязь фигур выпуска: ширины, глубины при различной высоте слоя руды.

Экспериментально получены зависимости:

$$2b = 0,2h + 4,3, \text{ см};$$

$$C = 0,12h + 1,0, \text{ см};$$

$$Q_r = 0,0187h, \text{ см}^3,$$

где $2b$ – ширина фигуры выпуска руды; C – глубина фигуры выпуска руды; Q_r – объем руды, выпущенный до начала разубоживания.

Вторая серия: выпуск руды под обрушенными породами из группы выработок. Руда выпускалась из блока, включающего в свой состав 3 орта с общей линией очистного забоя, отстоящих друг от друга на расстоянии 8 м. При этом ширина межортного целика принималась минимальной (4 м) по условию его устойчивости.

Руда и порода представлены эквивалентными материалами с соблюдением гранулометрического состава и других характеристик руды и породы. Материал, имитирующий покрывающие породы, обладал магнитными свойствами и отличался от материала, представляющего руду. Это позволяло отделить ее от «руды» магнитной сепарацией и установить уровень потерь и разубоживания:

$$\Pi = \frac{P_v}{P_m} \times 100, \text{ \%};$$

$$P = \frac{V_p}{V_p + V_r} \times 100, \text{ \%},$$

где Π – потери руды, %; P – разубоживание руды, %; P_v – масса выпущенной из модели руды, кг; P_m – масса засыпанной в модель руды, кг; V_p – объем выпущенной из модели породы, см³; V_r – объем выпущенной из модели руды, см³.

Выпуск из модели вели последовательно по 50 см³ из каждого отверстия до величины разубоживания в дозе 50 % (табл. 1).

Таблица 1. Показатели выпуска руды

Table 1. Indicators of ore drawing

Показатели Indicators (%)	Параметры выпуска/Draw parameters (м/м)		
	$h=10, c=2$	$h=15, c=2,5$	$h=25, c=3,5$
Q_r	14,8	34,6	40,5
Π	75,0	49,6	43,3
P	19,5	20,7	17,8

Подтверждено, что с увеличением высоты подэтажа извлечение чистой руды увеличивается, а потери и разубоживание уменьшаются.

Дополнительные возможности улучшения показателей извлечения предоставляет схема с шахматным расположением выпускных отверстий при увеличенной до 25 м высоте выпускаемого слоя для расстояния между ортами 8 м (табл. 2).

Таблица 2. Показатели выпуска при шахматном расположении выработок

Table 2. Draw indicators at checkerboarding of workings

Показатели/Indicators	Значения/Value
Массовое число чистой руды, % Mass number of pure ore, %	44,3
Потери/Loss, %	14,8
Разубоживание/Dilution, %	22,6

При отработке запасов в сложных горно-геологических условиях для повышения извлечения полезного ископаемого целесообразно: увеличение высоты выпускаемого слоя до 20–25 м, уменьшение межортных целиков до 4 м, опережающее бурение скважин и оптимальный угол наклона плоскости очистного забоя.

Третья серия: выпуск руды под обрушенными породами при изменяющихся параметрах: высоте слоя 10, 15, 20 м и угле наклона плоскости очистного забоя $\alpha_{cn}=80^\circ$.

Одни исследователи считают, что при изменении плоскости забоя от 800° до 100° показатели извлечения практически не изменяются. Другие утверждают, что извлечение руды при $\alpha_{cn}=80^\circ$ на 10–15 % выше, чем при $\alpha_{cn}=90^\circ$.

Конструкция модели позволяла менять толщину слоя в зависимости от его высоты.

Сравнение результатов второй и третьей серии показывает, что показатели извлечения в модели при $\alpha_{cn}=80^\circ$ выше, чем при $\alpha_{cn}=90^\circ$ (табл. 3).

Таблица 3. Показатели выпуска при изменении угла наклона

Table 3. Draw indicators at inclination change

Показатели/Indices, %	Высота слоя/Bed height (м/м)		
	10	15	20
Извлечение/Extraction	36	58	60
Потери/Losses	64	42	40
Разубоживание/Dilution	19	20	12

Показатели извлечения улучшаются за счет более полного согласования фигуры выпуска с геометрией очистного забоя. Снижение величины разубоживания объясняется также увеличением давления при выпуске на наклонную стенку забоя, что препятствует проникновению покрывающих пород в зону выпуска.

В процессе отработки экспериментального блока осуществляли комплексные наблюдения за устойчивостью межортных целиков шириной

4 м, которые не отметили существенных проявлений горного давления в течение 4 месяцев [6].

В других блоках месторождения интенсивное проявление горного давления наблюдали в центральной части Главной залежи. С понижением горных работ давление возрастало. Усиление горного давления происходило сразу же после начала очистных работ, и в процессе отработки блоков выпускные выработки перекреплялись, хотя ширина межортвых целиков была не менее 6 м.

Первые проявления горного давления в опытном блоке наблюдались вследствие одновременно взрывания в скважинах 1 т взрывчатого вещества. Горное давление носило скачкообразный характер, проявлявшийся в мгновенном расслоении и смятии пород лежащего бока в зоне сопряжений ортов со сборочным штреком и резком нарастании давления на крепежные рамы.

Моделирование выпуска при этом варианте подтверждает более высокую устойчивость нарезных выработок и межортвых целиков. При 20-метровой высоте подэтажа межортвые целики шириной 4 м сохраняют несущую способность в наиболее неустойчивой зоне месторождения в течение 2–2,5 месяцев после начала очистных работ, в то время как при высоте подэтажа 10 м нарезные выработки нарушались сразу после их проведения.

Вариант с повышенной высотой подэтажа обеспечивает экономический эффект за счет сокращения объема нарезных работ в два раза по сравнению с базовым вариантом, позволяет сократить число действующих очистных забоев за счет увеличения объема руды в отбиваемом слое, повысить концентрацию горных работ и загруженность погружно-доставочной техники [7–10].

Система подэтажного обрушения с торцовым выпуском обладает технологическим приоритетом при предстоящей конверсии разработки многих рудных месторождений России на подземный способ.

Подземный способ разработки железорудных месторождений является основным на действующих предприятиях Алтая-Саянской территории [11–12].

Абаканский, Казский, Таштагольский и Шерегешский рудники вместе выдают более половины объема подземной добычи железных руд России из мощных залежей на глубинах 500–800 м при коэффициенте крепости руд 10–14 по шкале проф. Протодяконова. Решается вопрос об отработке участка Таштагольского месторождения, под рекой Кондомой системой разработки с твердеющей закладкой. Подземным способом разрабатывают

Коробковское месторождение (КМА) и Яковлевское месторождение – Яковлевский рудник (ООО «Металл-групп», Белгородской области) [13–15].

Перспективы освоения запасов новых месторождений России позволяют утверждать, что в подавляющем большинстве случаев наиболее вероятным способом добычи руд является система подэтажного обрушения с торцовым выпуском и закладкой выработанного пространства твердеющими смесями [16–18].

Благоприятствующим обстоятельством для расширения области применения системы подэтажного обрушения с торцовым выпуском является прорывное развитие технологий приготовления твердеющих смесей для закладки выработанного пространства, как условие реализации природоохранных и ресурсосберегающих технологий [19–20].

Выводы

При добыче руд вариантами с подэтажным обрушением с торцовым выпуском корректно увязаны ее параметры: ширина фигуры выпуска, глубина фигуры выпуска и объем руды, выпущенный до начала разубоживания, что предоставляет возможность управления качеством добываемой руды.

Основными факторами улучшения показателей извлечения являются увеличение высоты подэтажа и шахматное расположение выпускных отверстий при увеличенной до 25 м высоте выпускаемого слоя и расстоянии между ортами 8 м.

Заключение

Увеличение объемов производства металлов для обеспечения потребностей людей будет сопровождаться совершенствованием горного производства, в том числе добычи руд. При этом приоритетными будут технологии, позволяющие интенсифицировать производство с увеличением объемов добычи без ущерба для качества.

Поэтому система подэтажного обрушения будет развиваться по пути изыскания внутренних резервов в виде параметров производственных процессов. Задачей совершенствования системы остается сохранение ее достоинств в виде независимости процессов и сокращение объема подготовительно-нарезных выработок с уменьшением потерь и разубоживания.

Расширение области применения этого прогрессивного варианта и дальше возможно по пути установления закономерностей взаимодействия технологических и природных условий применения варианта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Matthews T. Dilution and ore loss projections: Strategies and considerations // Mining: Navigating the Global Waters: 2015 SME Annual Conference and Expo and CMA 117th National Western Mining Conference. – Denver, United States, 15–18 February 2015. – P. 529–532.
2. Ляшенко В.И. Природоохранные технологии освоения сложноструктурных месторождений полезных ископаемых // Маркшейдерский вестник. – 2015. – № 1. – С. 10–15.
3. Parker H.M. Reconciliation principles for the mining industry // Mining Techn. – 2012. – V. 121 (3). – P. 160–176.
4. Harris J.M., Roach B. Environmental and Natural Resource Economics. A Contemporary Approach. – New York: M.E. Sharpe, Inc., Armonk, 2013. – 276 p.
5. Актуальные вопросы добычи цветных, редких и благородных металлов / В.К. Бубнов, В.И. Голик, А.М. Капканщиков, А.Е. Воробьев, З.М. Хадонов, И.В. Поляцкий, Н.К. Руденко, А.В. Югай, О.З. Габараев, Т.В. Чекушина: монография. – Акмола: Жана-Арка, 1995. – 601 с.
6. Голик В.И. Основы научных исследований в горном деле. – М.: Инфра-М. – 2014. – 116 с.
7. Davis G.A., Newman A.M. Modern strategic mine planning // Proc. of the Australian Mining Technology Conference, AusIMM. – Carlton, Australia, 2008. – P. 129–139.
8. Dubiński J. Sustainable Development of Mining Mineral Resources // J. Sustain. Min. – 2013. – № 1. – P. 1–6.
9. Dimitrakopoulos R.G., Abdel Sabour S.A. Evaluating Mine Plans under Uncertainty: Can the Real Options Make a Difference // Resources Policy. – 2007. – V. 32. – P. 116–125.
10. 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.
11. Филиппов П.А. Разработка и научное обоснование геотехнологий добычи железных руд при освоении природных и техногенных месторождений Западной Сибири: дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 2012. – 325 с.
12. 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.
13. Бабец А.М., Лейзерович С.Г., Тиганова Ю.В. Вклад ОАО «НИИКМА» в решение проблем Курской магнитной аномалии // Горный журнал. – 2014. – № 8. – С. 98–104.
14. Ресурсовоспроизводящие, экологически сбалансированные геотехнологии комплексного освоения месторождений Курской магнитной аномалии / К.Н. Трубецкой, Д.Р. Каплунов, В.К. Томаев, И.И. Помельников // Горный журнал. – 2014. – № 8. – С. 45–54.
15. Сергеев С.В., Зайцев Д.А. Методика контроля НДС складочного массива как инструмент оценки геомеханической ситуации в слоевой системе разработки неустойчивых руд // Горный журнал. – 2015. – № 8. – С. 121–126.
16. Язиков В.Г. Перспективы развития урановой промышленности Республики Казахстан. Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов: сборник статей. Т. 1: Уран. – М.: ИД «Руда и Металлы», 2005. – С. 67–76.
17. Study on rock mechanics in deep mining engineering / He Manchao, Xie He-ping, Peng Su-ping, et al. // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. – 2005. – № 16. – P. 2804–2813.
18. Gattinoni P., Pizzarotti E.M., Scesi L. Engineering Geology for Underground Works. – Heidelberg: Springer, 2014. – 312 p.
19. Golik V.I., Hasheva Z.M. Economical Efficiency of Utilization of Allied Mining Enterprises Waste // The Social Sciences. – 2015. – № 10 (5). – P. 682–686.
20. Evaluating the Effectiveness of Utilization of Mining Waste / V. Golik, A. Doolin, M. Komissarova, R. Doolin // International Business Management. – 2015. – № 9 (5). – P. 1993–5250.

Поступила 28.09.2016 г.

Информация об авторах

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

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

Комащенко В.И., доктор технических наук, профессор кафедры горного дела Северо-Кавказского государственного технологического университета.

UDC 504.55.054:622(470.6)

MODELING ORE QUALITY USING ORE CAVING TECHNIQUE

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

Victor G. Lukyanov³,
Lukyanov@tpu.ru

Vitaly I. Komashchenko¹,
komashchenko@inbox.ru

¹ North Caucasus State Technical University,
44, Cosmonaut Nikolayev street, Vladikavkaz, 362021, Russia

² Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,
93a, Markov street, Vladikavkaz, 362002, Russia.

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

Relevance of the research is caused by the need to expand the application of sublevel caving with front draw owing to the trend of mining conversion to underground method. The conversion is limited by a high level of ore losses and dilution.

The aim of the research is to study the possibility of reducing ore technical losses and dilution by rocks crumble at ore draw form the chambers by optimizing the design parameters of the system as a condition to ensure the profitability of the technique applied.

Methods: analysis of the advanced experience in developing similar fields based on publications, physical modeling of extraction cleaning parameter and forecasting the ways of developing the technique.

Results. The paper introduces the results of the research in field and laboratory conditions. The efficiency of the technique with the collapse reduces due to decrease of breaking arrays. The authors have confirmed the logical relationship between the parameters of ore draw and its quality and recommended the optimal parameters of excavation panels. It was ascertained that the chamber 80° decline enhances the quality indices. When extracting ore with the options with sublevel caving with front draw the parameters of the mining method: width and depth of a draw figure and volume of ore, drawn before dilution that enables controlling the quality of the extracted ore, are correctly aligned. The main factors of improving the extraction rates are the increase of substage height and checkerboarding of outlets with the 25 m increased height of ore bed and the distance between the unit vectors of 8 m.

Conclusions. Ore extraction from bowels by the outlets checkerboarding scheme at the increased height of ore bed provides economic benefits due to reduce of the amount of first workings, allows decreasing the number of active stopes due to the growth of ore volume in a breaking layer, increasing concentration of mountain works and loading and haulage equipment congestion.

Key words:

Technology, development, field, breaking, draw, quality, layer, ore.

REFERENCES

- Matthews T. Dilution and ore loss projections: Strategies and considerations. *Annual Conference and Expo and CMA 117th National Western Mining Conference. Mining: Navigating the Global Waters*. Denver, United States, 15–18 February 2015. pp. 529–532.
- Liashengko V.I. Prirodokhrannye tekhnologii osvoeniya slozhnostrukturnykh mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh [Nature protection technologies of developing complicated mineral deposits]. *Surveying messenger*, 2015, no. 1, pp. 10–15.
- Parker H.M. Reconciliation principles for the mining industry. *Mining Techn.*, 2012, vol. 121 (3), pp. 160–176.
- Harris J.M., Roach B. *Environmental and Natural Resource Economics. A Contemporary Approach*. New York, M.E. Sharpe, Inc., Armonk, 2013. 276 p.
- Bubnov V.K., Golik V.I., Kapkashchikov A.M., Vorobyov A.E., Khadonov Z.M., Polyatsky I.V., Rudenko N. K., Yugay A.V., Gabarayev O. Z., Chekushina T.V. *Aktualnye voprosy dobychi tsvetnykh, redkikh i blagorodnykh metallov* [Topical issues of extracting non-ferrous, rare and precious metals]. Akmola, Zhana-Arka Publ., 1995. 601 p.
- Golik V.I. *Osnovy nauchnykh issledovaniy v gornom dele* [Bases of scientific researches in mining]. Moscow, Infra-M Publ., 2014. 116 p.
- Davis G.A., Newman A.M. Modern strategic mine planning. *Proc. of the Australian Mining Technology Conference, Aus IMM*. Carlton, Australia, 2008. pp. 129–139.
- Dubiński J. Sustainable Development of Mining Mineral Resources. *J. Sustain. Min.*, 2013, no. 1, pp. 1–6.
- Dimitrakopoulos R.G., Abdel Sabour S.A. Evaluating Mine Plans Under Uncertainty: Can the Real Options Make a Difference? *Resources Policy*, 2007, vol. 32, pp. 116–125.
- 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.
- Filippov P.A. *Razrabotka i nauchnoe obosnovanie geotekhnologii dobychi zheleznykh rud pri osvoenii prirodnnykh i tekhnogennykh mestorozhdeniy Zapadnoy Sibiri*. Dis. Dokt. nauk [Development and scientific justification of iron ores extracting geotechnologies when developing natural and technogenic fields of Western Siberia. Dr. Diss.]. Novosibirsk, 2012. 325 p.
- 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.
- Babets A.M., Leyzerovich S.G., Tiganova Yu.V. Vklad JSC NIIKMA v reshenie problem Kurskoy magnitnoy anomalii [Contribution of JSC «NIIKMA» in solving the problems of the Kursk magnetic anomaly]. *Mountain magazine*, 2014, no. 8, pp. 98–104.

14. Trubetskoy K.N., Kaplunov D.R., Tomayev V.K., Pomelnikov I.I. Resursovosproizvodyashchie, ekologicheski sbalansirovannye geotekhnologii kompleksnogo osvoeniya mestorozhdeniy Kurskoy magnitnoy anomalii [Resours-reproducing, ecologically balanced geotechnologies of complex development of Kursk magnetic anomaly fields]. *Mountain magazine*, 2014. no. 8, pp. 45–54.
15. Sergeev S.V., Zaytsev D.A. Metodika kontrolya NDS zakladnogo massiva kak instrument otsenki geomekhanicheskoy situatsii v sloevoy sisteme razrabotki neustoychivyykh rud [Technique of controlling VAT of the stowage massif as a tool of assessing geomechanical situation in layered system of development of unstable ores]. *Mountain magazine*, 2015, no. 8, pp. 121–126.
16. Yazikov V.G. *Perspektivy razvitiya uranovoy promyshlennosti Respubliki Kazakhstan. Podzemnoe i kuchnoe vyshchelachivanie urana, zolota i drugikh metallov* [Prospects of developing uranium industry of the Republic of Kazakhstan. Underground and heap leaching of uranium, gold and other metals]. Moscow, Rudy i metally Publ., 2005. Vol. 1, pp. 67–76.
17. He Man-chao, Xie He-ping, Peng Su-ping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, no. 16, pp. 2804–2813.
18. Gattinoni P., Pizzarotti E. M., Scesi L. *Engineering Geology for Underground Works*. Heidelberg, Springer, 2014. 312 p.
19. Golik V.I., Hasheva Z.M., Economical Efficiency of Utilization of Allied Mining Enterprises Waste. *The Social Sciences*, 2015, no. 10 (5), pp. 682–686.
20. Golik V., Doolin A., Komissarova M., Doolin R. Evaluating the Effectiveness of Utilization of Mining Waste. *International Business Management*, 2015, no. (5), pp. 1993–5250.

Received: 28 September 2016.

Information about the authors

Vladimir I. Golik, Dr. Sc., professor, North Caucasus State Technical University; chief researcher, Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.

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

Vitaly I. Komashchenko, Dr. Sc., professor, North Caucasus State Technical University.

УДК 551.345:528.88

ОБОБЩЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОЩАДЕЙ МАЛЫХ ОЗЕР В КРИОЛИТОЗОНЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Полищук Юрий Михайлович^{1,2},
yupolishchuk@gmail.com

Богданов Александр Николаевич¹,
albo06@yandex.ru

Муратов Ильдар Наильевич¹,
ildarmur@gmail.com

Полищук Владимир Юрьевич^{3,4},
liquid_metal@mail.ru

¹ Центр дистанционного зондирования Земли АУ «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий»,
Россия, 628011, г. Ханты-Мансийск, ул. Мира, 151.

² Институт химии нефти СО РАН,
Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 4.

³ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 8/3.

⁴ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы обусловлена необходимостью уточнения вида закона распределения размеров озер для оценки эмиссии метана из малых термокарстовых озер на обширных территориях криолитозоны. В настоящее время гистограммы этих распределений получают по космическим снимкам на отдельных тестовых участках, что вызывает сложности в определении вида закона распределения озер на территории криолитозоны, из-за отсутствия методологии обобщения эмпирических гистограмм распределения размеров озер, полученных на ограниченной совокупности тестовых участков, на всю территорию исследований.

Цель работы: изложение методических вопросов определения закона распределения площадей малых термокарстовых озер в криолитозоне в широком диапазоне их размеров на основе обобщения гистограмм распределения озер по площадям, получаемых по космическим снимкам на ограниченной совокупности тестовых участков на территории исследований.

Методы исследования: дистанционные методы исследования полей термокарстовых озер с использованием спутниковых снимков; метод тестовых (ключевых) участков; метод определения зон активного термокарста с использованием спутниковых снимков; методы геоинформационных систем для пространственного анализа данных о термокарстовых озерах, полученных из спутниковых изображений.

Результаты. Рассмотрены методические вопросы обобщения эмпирических гистограмм распределения озер по площадям, полученным по снимкам высокого разрешения на ограниченной совокупности тестовых участков, на всю территорию исследований с целью определения вида закона обобщенного распределения озер по площадям. Предлагаемый подход к построению эмпирических гистограмм основан на использовании снимков высокого разрешения Канопус-В, БКА и ALOS, отражающих распределения малых озер. Дистанционные исследования проведены на 66 тестовых участках, расположенных достаточно равномерно на территории криолитозоны Западной Сибири. Обобщенная гистограмма распределения озер по площадям в криолитозоне, представленная в виде графика в двойном логарифмическом масштабе, обеспечивающем ее компактное представление в очень широком диапазоне изменения размеров озер, допускает линейную аппроксимацию, что подтверждает степенной вид обобщенного распределения озер в криолитозоне Западной Сибири.

Ключевые слова:

Вечная мерзлота, геоинформационные системы, термокарстовые озера, спутниковые снимки, статистическое распределение площадей озер, тестовые участки, зоны активного термокарста.

Введение

Для решения задач климатического прогноза и, в частности, для оценки и прогнозирования объемов эмиссии парниковых газов из термокарстовых озер в зонах многолетней мерзлоты необходимы знания о законах распределения озер по площадям [1–4]. Ввиду труднодоступности и высокой степени заболоченности территории в зонах мер-

злоты получение таких данных без применения методов дистанционного зондирования поверхности Земли невозможно.

В последнее время проведены дистанционные исследования распределения площадей термокарстовых озер в Сибири и в некоторых других северных регионах [5–9]. В большинстве этих исследований использовались космические снимки сред-

него разрешения (30 м) Landsat, обеспечивающие многократное полное покрытие земного шара. Но на этих снимках не обнаруживаются озера малых размеров. Поэтому полученные по этим данным эмпирические распределения площадей озер не учитывают вклад малых термокарстовых озер, концентрация метана в которых, согласно [10], более чем на порядок превышает его концентрацию в озерах с размерами более 0,1–0,5 га.

В ряде работ, например [11, 12], для изучения распределений термокарстовых озер в зоне мерзлоты использовались снимки высокого и сверхвысокого разрешения. Однако эти снимки из-за малой полосы охвата территории обеспечивают сравнительно небольшое покрытие исследуемой территории, что позволяет изучить распределение площадей озер лишь на небольших по размерам территориях в пределах тестовых участков. Для оценки запасов метана в термокарстовых озерах на обширных территориях криолитозоны, как следует из [2, 4], необходимо использовать знания о распределении озер на всей исследуемой территории. Методические вопросы определения таких законов распределения озер по ограниченным данным о числе и площадях озер, полученным на небольшом числе тестовых участков на исследуемой территории, в настоящее время не разработаны.

В связи с изложенным, целью настоящей работы явилось исследование методических вопросов построения гистограмм обобщенного распределения озер по площадям, получаемых с помощью космических снимков высокого разрешения, на примере термокарстово-озерных равнин криолитозоны Западной Сибири.

Данные и методы исследования

Согласно [13] образование термокарстовых озер происходит под воздействием нескольких факторов, главными из которых являются наличие высокольдистых многолетнемерзлых пород и равнинный характер территории. В [14, 15] на основе геоморфологического и климатического анализа вся криолитозона Западной Сибири отнесена к числу районов с повсеместным распространением термокарстовых озер. Поэтому озера, исследуемые в настоящей работе дистанционным методом, рассматриваются как термокарстовые озера.

Исследования распределения озер в настоящей работе проводились в криолитозоне Западной Сибири с использованием космических снимков высокого разрешения Канопус-В (2,1 м), БКА (2,1 м) и ALOS (2,5 м). Все снимки выбирались в достаточно короткий период летнего сезона (конец июня – август) для минимизации влияния сезонных колебаний уровня воды в озерах. В этот период полностью исчезает ледовый покров на озерах, мешающий их выделению при дешифрировании снимков. Обработка космических снимков, проведенная с использованием стандартных средств геоинформационной системы ArcGIS 10.3, была на-

правлена на получение данных о численности и площадях озер для построения гистограммы распределения озер по площадям, которая представляет преимущественно озера небольших размеров.

В связи с необходимостью получения распределения площадей озер в достаточно широком диапазоне изменения их размеров (от десятков м² до десятков га) на основе снимков высокого разрешения предлагается для построения гистограмм выбирать частичные интервалы с неравномерным шагом (по логарифмическому закону), а именно: 50–100 м², 100–200 м², 200–500 м², 500–1000 м² и т. д. до 20 га. Заметим, что определение ширины указанных интервалов в логарифмическом масштабе (50, 100, 300, 500 м² и т. д.) позволяет компактно представить гистограмму распределения озер в достаточно широком диапазоне изменений площадей озер.

При получении другой исходной гистограммы, представляющей озера преимущественно малых размеров, основанной на снимках высокого разрешения, использовался метод тестовых (ключевых) участков. Обработка снимков высокого разрешения Канопус-В, БКА и ALOS проводилась на сценах в границах 66 тестовых участков, достаточно равномерно распределенных по территории островной, прерывистой и сплошной криолитозон Западной Сибири. Краткая характеристика этих участков и использованных в работе снимков высокого разрешения (ВР) дана в табл. 1, а на рис. 1 представлена схема размещения тестовых участков на исследуемой территории.

Таблица 1. Характеристика тестовых участков (ТУ) и космических снимков ВР

Table 1. Characteristics of the test sites (TS) and high resolution satellite images

Криолитозона Cryolithozone	Съемочный аппарат Satellite	Количество ТУ TS quantity	Номера ТУ TS numbers	Средняя площадь ТУ Average area of TS	Период съемки Date of shooting
Островная Sporadic	Канопус-В	29	1–29	2845	2013–2014
	ALOS	3	30–32	3355	2007–2008
Прерывистая Discontinuous	Канопус-В	18	33–50	3125	2013–2014
Сплошная Continuous	Канопус-В	11	51–61	3210	2014–2015
	ALOS	5	62–66	2910	2008

Выбранные тестовые участки, как видно из табл. 1, имеют приблизительно одинаковые размеры. Суммарная площадь всех ТУ составляет около 0,2 млн га, что соответствует 0,002 % от всей площади криолитозоны Западной Сибири, покрываемой снимками среднего разрешения (СР), использованными для формирования мозаики. В связи с этим возникает важный методический вопрос: как распространить полученные на отдельных тестовых

вых участках данные о площадях малых озер, полученные на основе снимков ВР, на всю территорию исследований с целью построения гистограммы распределения площадей озер малых размеров в криолитозоне Западной Сибири?

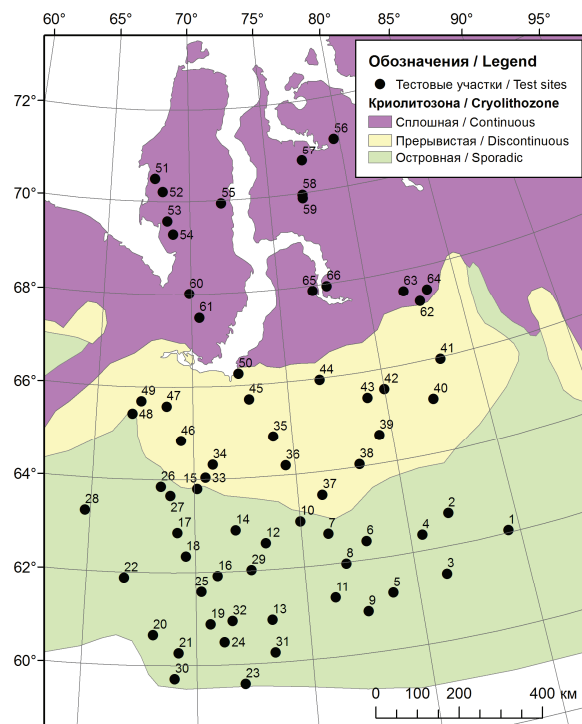


Рис. 1. Схема размещения тестовых участков в криолитозоне Западной Сибири

Fig. 1. Scheme of location of test sites in cryolithozone of Western Siberia

Тестовые участки выбирались нами, как принято в подобных исследованиях, в местах скопления термокарстовых озер, т. е. в зонах, где существуют условия для формирования и развития очагов термокарстовых процессов [5]. Будем далее для краткости называть их зонами активного термокарста. Эти зоны занимают лишь часть территории криолитозоны Западной Сибири. Поэтому, в предположении об отсутствии озер вне границ этих зон, данные о числе и суммарной площади озер, полученные на тестовых участках, следует экстраполировать не на всю территорию криолитозоны, а только на ее часть, занятую зонами активного термокарста. В связи с этим необходимо определить общую площадь всех зон активного термокарста в криолитозоне Западной Сибири.

Методология формирования картографического слоя границ зон активного термокарста (АТ) с использованием снимков Landsat-8 описана в [16], согласно которой границы зон активного термокарста определяются как контуры, ограничивающие пространственные ассоциации (совокупности) озер и полученные путем объединения (агрегирования) близко расположенных друг к другу озер на снимках Landsat-8 (рис. 1). Эта процедура автоматиче-

ского определения границ зон АТ выполняется, согласно [16], с использованием инструмента пространственного анализа Aggregate Polygons [17] в программном комплексе ArcGIS 10.3.

Такой подход к определению зон АТ предполагает, что кроме хорошо обнаруживаемых по космоснимкам Landsat термокарстовых озер сравнительно больших размеров на исследуемой территории будут присутствовать также и малые озера (с размерами менее 0,2–0,3 га), не различимые на снимках СР, но которые будут хорошо видны на снимках высокого разрешения (ВР). Поэтому при автоматическом определении границ зон АТ по снимкам среднего разрешения возникают ошибки двух видов [16]: *ошибки занижения* общей площади автоматически определяемых границ зон АТ из-за пропуска малых озер при выборе слишком малого расстояния между озерами d (рис. 2) и *ошибки завышения* общей площади зон активного термокарста как результат включения в зону АТ участков территории, на которых вообще отсутствуют озера, при выборе слишком большого расстояния d .

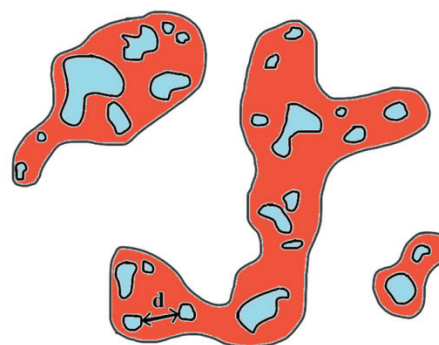


Рис. 2. Определение границ зон активного термокарста путем агрегирования озер

Fig. 2. Formation of borders of active thermokarst areas using lakes aggregation

Путем имитационных экспериментов, проведенных в [16] на различных участках исследуемой территории по снимкам Landsat-8 с использованием снимков ВР Канопус-В, было определено оптимальное расстояние d , минимизирующее указанные ошибки. При определении величины оптимального расстояния была использована процедура пространственного анализа, изложенная в [18, 19]. С учетом оптимальной величины d на основе мозаики снимков Landsat-8 были определены границы зон АТ на территории криолитозоны Западной Сибири, общая площадь которых составила 24,48 млн га. На основе экстраполяции экспериментальных данных о суммарной площади озер (S_o), полученных на тестовых участках по снимкам ВР, расчетная величина суммарной площади озер (S_p) на общей территории всех зон АТ может быть определена в виде

$$S_p = S_o \cdot t, \quad (1)$$

где $t=S_{AT}/S_{TY}$ (S_{AT} – общая (суммарная) площадь зон активного термокарста; S_{TY} – суммарная площадь тестовых участков).

Расчетное число озер N_p в зонах АТ будем определять аналогично (1) в виде

$$N_p = N_o \cdot t, \quad (2)$$

где N_o – экспериментально определенное (по снимкам ВР) число озер на всех ТУ.

Расчитанные по формулам (1) и (2) число озер N_p и величину их общей площади S_p на территории всех зон АТ следует относить (в предположении об отсутствии озер вне зон АТ) ко всей территории криолитозоны Западной Сибири. Распределение величин N_p и S_p по интервалам площадей в диапазоне от 50 м² до 20 га будет использовано далее при формировании гистограммы распределения озер (преимущественно малых размеров) на основе снимков ВР.

Построение гистограммы обобщенного распределения площадей озер

Перейдем к получению гистограммы распределения озер на основе снимков высокого разрешения. В результате обработки этих снимков на 66 тестовых участках исследуемой территории были получены в широком диапазоне изменения площадей озер (от 0,005 до 20 га) следующие экспериментальные данные о числе и суммарной площади озер: $N_o=60350$ и $S_o=57997$ га. Учитывая, что в нашем случае коэффициент $t=121$, путем экстраполяции величин N_o и S_o на территорию криолитозоны Западной Сибири с использованием формул (1) и (2) получим расчетные величины N_p и S_p для исследуемой территории. Так, число озер сравнительно малых размеров N_p , определяемое на основе снимков ВР на территории криолитозоны Западной Сибири, составляет около 7,3 млн, что на порядок превышает число озер, определенное на этой территории по снимкам СР. Общая площадь озер малых размеров S_p на этой же территории оценивается по снимкам ВР, согласно (1), величиной 6,5 млн га, сравнимой с общей площадью озер, определенной по снимкам СР (около 6 млн га). Распределяя число озер, найденных на исследуемой территории на основе снимков ВР в соответствии с (1) и (2), по интервалам площадей, получим искомую другую исходную гистограмму распределения площадей озер, которая отображается серыми столбиками на рис. 3 в диапазоне изменения площадей от 0,005 до 20 га.

Как видно в табл. 2, суммарная численность озер с размерами от 50 м² до 20 га в криолитозоне Западной Сибири оценивается величиной, превышающей 6,9 млн, а их суммарная площадь на исследуемой территории составляет 3 млн га. Отметим, что на рис. 3 цифры над столбиками гистограммы обозначают величину относительного числа озер в каждом частичном интервале гистограммы, определяемую в виде

$$k_i = n_i / N, \quad (3)$$

где n_i – число озер в i -м частичном интервале; N – суммарное число озер во всех интервалах обобщенной гистограммы в широком диапазоне изменения площадей озер – от 50 м² до 20 га.

Таблица 2. Распределение суммарных величин числа и площади озер с размерами до 20 га по интервалам их площадей

Table 2. Distribution of the total number and area of lakes under 20 ha by intervals of areas

Интервал площадей озер Interval of lake areas, га/ha	Суммарное число озер Total number of lakes	Относительное число озер k_i , % Relative number of lakes k_i , %	Суммарная площадь озер Total area of lakes, 1×10 ³ га/ha	Кол-во единичных интервалов Number of unit intervals	Нормированное число озер Normalized number of lakes w_i , %
0,005–0,01	1111990	16,2	7,913	1	54,2
0,01–0,02	1064679	15,4	15,207	2	25,9
0,02–0,05	1308978	18,9	42,237	5	12,7
0,05–0,1	895037	13,0	63,775	10	4,4
0,1–0,2	740641	10,7	105,310	20	1,8
0,2–0,5	752136	10,9	240,198	50	0,7
0,5–1	411521	6,0	291,723	100	0,2
1–2	284592	4,1	399,414	200	0,07
2–5	223729	3,2	686,689	500	0,022
5–10	78166	1,1	544,470	1000	0,004
10–20	43560	0,6	610,226	2000	0,001
Итого	6915029	100,0	3007,163	3888	100



Рис. 3. Обобщенная гистограмма распределения озер с размерами до 20 га в криолитозоне Западной Сибири по снимкам высокого разрешения

Fig. 3. Generalized histogram of distribution of lakes under 20 ha in the cryolithozone of Western Siberia, obtained by high-resolution satellite imagery

Приведенная выше обобщенная гистограмма распределения озер представлена, согласно [20], в виде гистограммы относительных частот. Переходя в каждом i -ом частичном интервале гистограммы к нормированным частотам

$$w_i = k_i / h_i, \quad (4)$$

где h_i – ширина i -го интервала, получим, в терминологии [20], нормированную гистограмму обобщенного распределения площадей озер в криолитозоне Западной Сибири, приведенную на рис. 4.

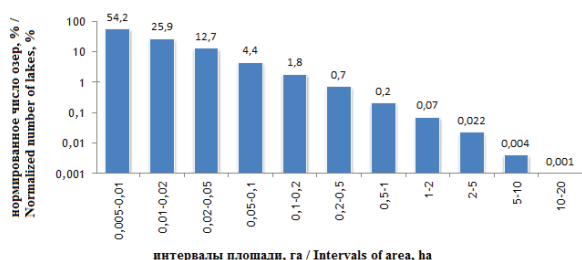


Рис. 4. Нормированная гистограмма распределения площадей озер в криолитозоне Западной Сибири по снимкам высокого разрешения

Fig. 4. Normalized histogram of lakes distribution in the cryolithozone of Western Siberia, obtained with by high-resolution satellite imagery

Определение вида закона распределения озер по площадям

График гистограммы распределения озер по площадям на рис. 4 представлен в двойном логарифмическом масштабе для проверки соответствия эмпирического распределения степенному закону в виде

$$w = A \cdot s^B, \quad (5)$$

где w – относительное число озер в интервалах гистограммы; s – площадь водной поверхности озер; A, B – коэффициенты степенной функции.

Как показано в [21], в случае степенного вида закона распределения озер по площадям графики гистограмм эмпирического распределения озер в двойном логарифмическом масштабе будут представляться линейными функциями. Действительно, прологарифмировав левую и правую части уравнения (5) и вводя подстановки $\lg w = y$ и $\lg s = x$, приводим (5) к линейному виду:

$$y = \lg A + Bx. \quad (6)$$

Уравнение (6) демонстрирует линейную зависимость логарифма относительного числа озер от логарифма величины их площадей на графиках гистограмм, представленных в двойном логарифмическом масштабе. На рис. 5 точками показаны значения нормализованного числа озер в интервалах гистограммы распределения озер по площадям, а прямая линия отображает график аппроксимирующей зависимости, полученной с высоким уровнем достоверности (коэффициент детерминации 0,99) в виде (6), что может служить подтверждением степенного закона распределения озер по площадям в виде (5). Из уравнения аппроксимации, приведенного в поле графика на рис. 5, определим следующие величины коэффициентов степенного закона распределения озер по площадям для территории криолитозоны Западной Сибири:

$$A = 0,096; B = -1,41.$$

Этот результат подтверждается данными о степенном виде закона распределения малых термокарстовых озер, полученными в исследованиях [21] на нескольких тестовых участках в сплошной

зоне мерзлоты. Заметим, что степенному закону также удовлетворяет и распределение озер по размерам в глобальном масштабе [22, 23]. Приведенные в статье результаты дистанционных исследований полей термокарстовых озер показывают, что и в исследованиях регионального масштаба на территории мерзлоты Западной Сибири по снимкам высокого разрешения распределение озер можно принимать соответствующим степенному закону, как и распределение площадей озер планеты. Следовательно, разработанный подход к построению обобщенных гистограмм позволяет определять вид закона распределения площадей малых термокарстовых озер на обширных территориях мерзлоты по спутниковым данным на ограниченном числе тестовых участков. Полученные результаты могут быть полезны в задачах прогнозирования запасов метана в термокарстовых водоемах и эмиссии метана в атмосферу в зонах многолетней мерзлоты северных регионов в условиях продолжающегося глобального потепления.

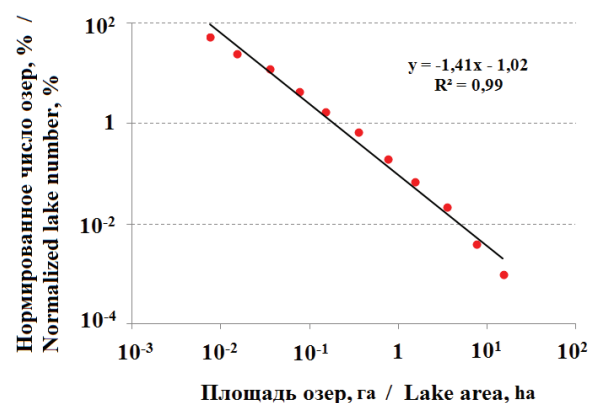


Рис. 5. Аппроксимация нормированной гистограммы обобщенного распределения площадей озер в криолитозоне Западной Сибири

Fig. 5. Approximation of normalized histogram of generalized lake size-distribution in cryolithozone of Western Siberia

Заключение

В статье рассмотрены вопросы использования космических снимков высокого пространственного разрешения для исследования распределения площадей термокарстовых озер на территориях многолетней мерзлоты в широком диапазоне изменений размеров озер. Для проведения исследований в работе использованы спутниковые снимки Канопус-В, БКА и ALOS высокого пространственного разрешения, позволившие с использованием средств геоинформационной системы ArcGIS 10.3 определить численность и площади большого числа озер на 66 тестовых участках приблизительно одинаковых размеров. Выбранные для исследования тестовые участки были достаточно равномерно размещены на территориях островной, прерывистой и сплошной криолитозон Западной Сибири.

Предложен подход к экстраполяции данных о численности и площадях термокарстовых озер, полученных на исследованной совокупности тестовых участков, на всю территорию криолитозоны с целью получения обобщенной гистограммы распределения площадей озер сравнительно малых размеров с использованием снимков высокого разрешения. Подход основан на применении методологии определения зон активного термокарста. С использованием этого подхода была построена обобщенная гистограмма распределения площадей

озер в широком диапазоне их изменения – от 50 м² до 20 га.

Полученная гистограмма обобщенного распределения площадей озер в криолитозоне Западной Сибири может быть использована для оценки объемов накопления парниковых газов в термокарстовых озерах исследуемой территории, определения вида закона распределения площадей озер в зонах мерзлоты, а также для решения задач климатического прогноза и др.

Работа поддержана грантом РФФИ (проект № 15-45-00075).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Methane dynamics in different boreal lake types / S. Juutinen, M. Rantakari, P. Kortelainen, J.T. Huttunen, T. Larmola, J. Alm, J. Sivola, P.J. Martikainen // *Biogeosciences*. – 2009. – № 6. – P. 209–223.
2. Seasonal variability as a source of uncertainty in the West Siberian regional CH₄ flux upscaling / A.F. Sabrekov, B.R.K. Runkle, M.V. Glagolev, I.E. Kleptsova, S.S. Maksyutov // *Environ. Res. Lett.* – 2014. – № 9. – P. 1–9.
3. Walter K.M., Smith L.C., Chapin F.S. Methane bubbling from northern lakes: present and future contributions to the global methane budget // *Phil. Trans. R. Soc.* – 2007. – V. 365. – P. 1657–1676.
4. Методические вопросы оценки запасов метана в малых термокарстовых озерах в зоне мерзлоты Западной Сибири / Ю.М. Полищук, В.Ю. Полищук, Н.А. Брыксина, О.С. Покровский, С.Н. Кирпотин, Л.С. Широкова // *Известия Томского политехнического университета*. – 2015. – Т. 326. – № 2. – С. 127–135.
5. Викторов А.С., Капранова В.Н., Трапезникова О.Н. Математическая модель морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин в изменяющихся климатических условиях // *Криосфера Земли*. – 2015. – Т. 19. – № 2. – С. 26–34.
6. Karlsson J.M., Lyon S.W., Destouni G. Temporal behavior of lake size-distribution in a thawing permafrost landscape in Northwestern Siberia // *Remote sensing*. – 2014. – № 6. – P. 621–636.
7. Polishchuk V.Yu., Polishchuk Yu.M. Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Ch. 6 // *Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems* / Ed. by O. Pokrovsky. – NY: Nova Science Publishers, 2014. – P. 205–234.
8. Kirpotin S., Polishchuk Y., Bryksina N. Abrupt changes of thermokarst lakes in Western Siberia: impacts of climatic warming on permafrost melting // *International Journal of Environmental Studies*. – 2009. – V. 66. – № 4. – P. 423–431.
9. Брыксина Н.А., Полищук Ю.М. Анализ изменения численности термокарстовых озер в зоне мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // *Криосфера Земли*. – 2015. – Т. 19. – № 2. – С. 114–120.
10. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia / O.S. Pokrovsky, L.S. Shirokova, S.N. Kirpotin, S. Audry, J. Viers, B. Dupre // *Biogeosciences*. – 2011. – V. 8. – P. 565–583.
11. Distribution of thermokarst lakes and ponds at three yedoma sites in Siberia / G. Grosse, V. Romanovsky, K. Walter, A. Morgenstern, H. Lantuit, S. Zimov // *Proc. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost*. – Fairbanks, Alaska, June 29 – July 3, 2008. – P. 551–556.
12. Polishchuk Y.M., Bryksina N.A., Polishchuk V.Y. Remote analysis of changes in the number and distribution of small thermokarst lakes by sizes in Cryolithozone of Western Siberia // *Izvestia. Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2015. – V. 51. – № 9. – P. 999–1006.
13. Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. – М.: Наука, 2006. – 252 с.
14. Крацова В.И. Распространение термокарстовых озер в России // *Вестник Московского университета. Сер. «География»*. – 2009. – № 3. – С. 33–42.
15. Крацова В.И., Быстрова А.Г. Изменения размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет // *Криосфера Земли*. – 2009. – Т. 13. – № 2. – С. 16–26.
16. Полищук Ю.М., Богданов А.Н. Зоны активного термокарста на территории многолетней мерзлоты и их выявление по космическим снимкам // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2015. – Т. 326. – № 12. – С. 104–114.
17. Aggregate polygons. URL: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#//00130000003p000000> (дата обращения: 25.06.2016).
18. Getis A., Ord J.K. The analysis of spatial association by use of distance statistics // *Geographical analysis*. – 1992. – V. 24. – № 3. – P. 189–206.
19. Ord J.K., Getis A. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application // *Geographical analysis*. – 1995. – V. 27. – № 4. – P. 286–306.
20. Полигон и гистограмма. URL: <http://umk.portal.kemsu.ru/uch-mathematics/papers/posobie/t4-3.htm> (дата обращения: 27.06.2016).
21. Полищук Ю.М., Муратов И.Н., Полищук В.Ю. Исследование полей малых термокарстовых озер в зоне сплошной мерзлоты Западной Сибири по спутниковым снимкам высокого разрешения // *Оптика атмосферы и океана*. – 2016. – Т. 29. – № 7. – С. 592–597.
22. Downing J.A., Prairie Y.T. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments // *Limnol. Oceanogr.* – 2006. – V. 51. – P. 2388–2397.
23. A global inventory of lakes based on high resolution satellite imagery / C. Verpoorter, T. Kutser, D.A. Seekel, L.J. Tranvik // *Geophys. Res. Lett.* – 2014. – V. 41. – P. 1–7.

Поступила 23.07.2016 г.

Информация об авторах

Полищук Ю.М., доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Центра дистанционного зондирования Земли АУ «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий»; главный научный сотрудник научно-исследовательского информационного центра Института химии нефти СО РАН.

Богданов А.Н., главный специалист Центра дистанционного зондирования Земли АУ «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий».

Муратов И.Н., главный специалист Центра дистанционного зондирования Земли АУ «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий».

Полищук В.Ю., кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН; ассистент кафедры вычислительной техники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 551.345:528.88

GENERALIZED HISTOGRAM OF LAKE SIZE-DISTRIBUTION IN PERMAFROST OF WESTERN SIBERIA BASED ON SATELLITE IMAGES OF HIGH RESOLUTION

Yury M. Polishchuk^{1,2},
yupolishchuk@gmail.com

Alexander N. Bogdanov¹,
albo06@yandex.ru

Ildar N. Muratov¹,
ildarmur@gmail.com

Vladimir Yu. Polishchuk^{3,4},
liquid_metal@mail.ru

¹ Ugra Research Institute of Information Technology,
151, Mira Street, Khanty-Mansiysk, 628011, Russia.

² Institute of Petroleum Chemistry, SB RAS,
4, Akademichesky Avenue, Tomsk, 634021, Russia.

³ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, SB RAS,
8/3, Akademichesky Avenue, Tomsk, 634021, Russia.

⁴ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance of the research is caused by the need to clarify the type of law of lakes size-distribution for estimating methane emission from small thermokarst lakes in vast areas of permafrost. Currently, the histograms of the distributions are obtained by satellite images on separate test sites. This causes difficulty in determining the type of lakes distribution law on all the territory of the permafrost zone, due to the lack of methodology of generalizing the empirical histograms of lake distribution, obtained on a limited set of test sites, on the entire territory of research.

The main aim of the research is to develop the methodological issues of determining the law of distribution of small thermokarst lakes areas in permafrost in a wide range of sizes based on generalization of the lakes size-distribution histograms, obtained by satellite images on a limited set of test sites, on the study territory.

Methods: remote study of thermokarst lakes fields based on satellite imagery; method of test (key) sites; method for determining the active thermokarst areas using satellite imagery; methods of geographic information systems for spatial analysis of data on thermokarst lakes.

Results. The authors have considered the methodical issues of generalizing empirical histograms of lakes size-distribution, obtained by high-resolution images on a limited set of test sites, on the entire territory of studies, to determine the type of law of the generalized lakes size-distribution. The proposed approach to construction of empirical histograms is based on application of high resolution images of Canopus-V, ALOS and BKA, reflecting the distribution of small lakes. Remote study was carried out at 66 test sites located quite evenly on the territory of the permafrost zone of Western Siberia. The linear approximation of generalized histogram of lakes size-distribution in permafrost territory, represented as a graph in double logarithmic scale, providing its compact representation in a very wide range of changes in lake sizes, confirms the power form of generalized size-distribution of lakes in the permafrost zone of Western Siberia.

Key words:

Permafrost, geoinformation systems, thermokarst lakes, satellite images, statistical size-distribution of lakes, test sites, area of active thermokarst.

The research was supported by RFBR grant (project No. 15–45–00075).

REFERENCES

1. Juutinen S., Rantakari M., Kortelainen P., Huttunen J.T., Larmola T., Alm J., Sivola J., Martikainen P.J. Methane dynamics in different boreal lake types. *Biogeosciences*, 2009, no. 6, pp. 209–223.
2. Sabrekov A.F., Runkle B.R.K., Glagolev M.V., Kleptsova I.E., Maksyutov S.S. Seasonal variability as a source of uncertainty in the West Siberian regional CH₄ flux upscaling. *Environ. Res. Lett.*, 2014, no. 9, pp. 1–9.
3. Walter K.M., Smith L.C., Chapin F.S. Methane bubbling from northern lakes: present and future contributions to the global methane budget. *Phil. Trans. R. Soc.*, 2007, vol. 365, pp. 1657–1676.
4. Polishchuk Yu.M., Polishchuk V.Yu., Bryksina N.A., Pokrovskiy O.S., Kirpotin S.N., Shirokova L.S. Methodical issues for evaluating methane reserves in small thermokarst lakes in the permafrost of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 2, pp. 127–135. In Rus.

5. Viktorov A.S., Kapranova V.N., Trapeznikova O.N. Mathematical model of lacustrine-thermokarst plain morphostructure under the changing climatic conditions. *Cryosphere of Earth*, 2015, vol. 19, no. 2, pp. 26–34. In Rus.
6. Karlsson J.M., Lyon S.W., Destouni G. Temporal behavior of lake size-distribution in a thawing permafrost landscape in Northwestern Siberia. *Remote sensing*, 2014, no. 6, pp. 621–636.
7. Polishchuk V.Yu., Polishchuk Yu.M., Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Ch. 6. *Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems*. Ed. by O. Pokrovsky. New York, Nova Science Publishers, 2014. pp. 205–234.
8. Kirpotin S., Polishchuk Y., Bryksina N. Abrupt changes of thermokarst lakes in Western Siberia: impacts of climatic warming on permafrost melting. *International Journal of Environmental Studies*, 2009, vol. 66, no. 4, pp. 423–431.
9. Bryksina N.A., Polishchuk Yu.M. Analysis of changes in the number of thermokarst lakes in permafrost of Western Siberia on the basis of satellite images. *Cryosphere of Earth*, 2015, vol. 19, no. 2, pp. 114–120. In Rus.
10. Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N., Audry S., Viers J., Dupre B. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia. *Biogeosciences*, 2011, vol. 8, pp. 565–583.
11. Grosse G., Romanovsky V., Walter K., Morgenstern A., Lantuit H., Zimov S. Distribution of thermokarst lakes and ponds at three yedoma sites in Siberia. *Proc. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost*. Fairbanks, Alaska, June 29 – July 3, 2008. pp. 551–556.
12. Polishchuk Y.M., Bryksina N.A., Polishchuk V.Y. Remote analysis of changes in the number and distribution of small thermokarst lakes by sizes in Cryolithozone of Western Siberia. *Izvestia. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, vol. 51, no. 9, pp. 999–1006.
13. Viktorov A.S. *Osnovnye problemy matematicheskoy morfologii landshafta* [Key issues of landscape mathematical morphology]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 252 p.
14. Kravtsova V.I. Dissemination of thermokarst lakes in Russia. *Vestnik of Moscow State University. Geography*, 2009, no. 3, pp. 33–42. In Rus.
15. Kravtsova V.I., Bystrova A.G. Changes of thermokarst lake areas in different regions of Russia for the last three decades. *Cryosphere of Earth*, 2009, vol. 13, no. 2, pp. 16–26. In Rus.
16. Polishchuk Yu.M., Bogdanov A.N. Zony aktivnogo termokarsta na territorii mnogoletnei merzloty i ikh vyyavlenie po kosmicheskimi snimkam, (Active thermokarst zones on permafrost territory and their detecting on space images). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 12, pp. 104–114. In Rus.
17. *Aggregate Polygons*. Available at: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#//00130000003p000000> (accessed 25 June 2016).
18. Getis A., Ord J.K. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical analysis*, 1992, vol. 24, no. 3, pp. 189–206.
19. Ord J.K., Getis A. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application. *Geographical analysis*, 1995, vol. 27, no. 4, pp. 286–306.
20. *Polygon and histogram*. Available at: <http://umk.portal.kem-su.ru/uch-mathematics/papers/posobie/t4-3.htm> (accessed 27 June 2016).
21. Polishchuk Yu.M., Muratov I.N., Polishchuk V.Yu. Research of fields of small thermokarst lakes in continuous zone of permafrost of Western Siberia by the high resolution satellite images. *Atmospheric and oceanic optics*, 2016, vol. 29, no. 07, pp. 592–597. In Rus.
22. Downing J.A., Prairie Y.T. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. *Limnol. Oceanogr.*, 2006, vol. 51, pp. 2388–2397.
23. Verpoorter C., Kutser T., Seekel D.A., Tranvik L.J. A global inventory of lakes based on high resolution satellite imagery. *Geophys. Res. Lett.*, 2014, vol. 41, pp. 1–7.

Received: 23 July 2016.

Information about the authors

Yury M. Polishchuk, Dr. Sc., professor, chief research scientist, Ugra Research Institute of Information Technology; chief research scientist, Institute of Petroleum Chemistry, SB RAS.

Alexander N. Bogdanov, principle engineer, Ugra Research Institute of Information Technology.

Ildar N. Muratov, principle engineer, Ugra Research Institute of Information Technology.

Vladimir Y. Polishchuk, Cand. Sc., Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems; assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 532.529.5, 532.54

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ В ВОДОНЕФТЯНОЙ ЭМУЛЬСИИ ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ В НЕОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Зайковский Всеволод Викторович¹,
alkast@tpu.ru

Харламов Сергей Николаевич¹,
felic@tpu.ru

Муратов Василий Михайлович¹,
vmm@tpu.ru

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

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения качества подготовки и переработки нефти, снижения содержания воды в сырой нефти, поступающей на нефтеперерабатывающие заводы, а также целесообразностью расширения банка экспериментальных данных о закономерностях динамики капель воды в гетерогенных средах, таких как водомасляные эмульсии, при их обработке неоднородным электрическим полем. Данные сведения весьма актуальны при разработке теоретических моделей процессов переноса в смесях, весьма ценны и полезны в вопросах совершенствования методик и методов интенсификации фазового и компонентного разделения состава эмульсий, выработки технических решений по совершенствованию конструкций аппаратов для разделения водонефтяных эмульсий.

Цель работы: экспериментальное исследование отклонений отдельных капель воды в масле от траектории свободного падения под действием неоднородного электрического поля различной интенсивности, а также анализ пространственного распределения капель воды в эмульсии при такой обработке.

Методы исследования: наблюдение и анализ движения отдельных капель соленой и пресной воды, и капель в составе эмульсии в экспериментальной ячейке при обработке в электрическом поле, созданном плоскими электродами различных линейных размеров.

Результаты. Показано, что относительное отклонение капли к короткому электроду нелинейно зависит от напряженности электрического поля в центре межэлектродного пространства: при напряженности 2,61–2,93 кВ/см среднее относительное отклонение капель составляет 33–46 %, при напряженности 3,31 кВ/см наблюдается отскок капель воды в противоположную от электрода сторону, отклонение сокращается до 18 %, при напряженности в 3,5 кВ/см наблюдается отскок и повторное притяжение капель, вплоть до границы электрода, что дает максимальное смещение капель в среднем на 57 %. Содержание солей хлорида натрия концентрации 3,4 моль/литр в промысловой воде отрицательно сказывается на эффективности обработки капель воды неоднородным электрическим полем – отклонение соленых капель в среднем на 42 % ниже, чем отклонение капель пресной воды. Показано, что отклонение капель воды в масле в неоднородном электрическом поле не зависит от диаметра капель. Имеют место три зоны скопления капель вокруг короткого электрода, характер движения капель в каждой из них различен и может быть использован для оптимизации формы электродов в аппаратах, реализующих обработку в неоднородном электрическом поле.

Ключевые слова:

Подготовка нефти, водонефтяная эмульсия, электрическое поле, содержание солей, диаметр капель.

Введение

Подготовка и переработка нефти неразрывно связана с процессами обезвоживания и обессоливания водонефтяных эмульсий. На начальной стадии извлечения и подготовки вода является необходимым материалом для реализации таких технологических процессов, как увеличение пластового давления в скважине, а также обессоливание нефти путем смешения с пресной водой. В дальнейшем, после выполнения своих функций, вода удаляется из нефти, поскольку содержит экстрагированные соли и механические примеси, снижающие срок службы технологического оборудования, занимает полезный объем аппаратов, промысловых и магистральных нефтепроводов. Кроме того, вода аккумулирует тепло при переработке нефти и в дисперсном виде значительно увеличивает вязкость гетерогенной системы [1, 2].

Обезвоживание нефти входит в состав технологического цикла при промысловой подготовке для сдачи в магистральные нефтепроводы, а также при окончательной подготовке нефти перед переработкой на нефтеперерабатывающих заводах. При этом, в соответствии с требованиями государственного стандарта РФ, в товарной нефти массовая доля воды не должна превышать 1 % [3].

Эксплуатируемые на нефтепромыслах и нефтеперерабатывающих заводах аппараты по электрообезвоживанию и обессоливаю нефти, как правило, реализуют комбинированный способ обработки водонефтяных эмульсий: ввод деэмульгаторов, совмещенный с нагревом и обработкой эмульсии в однородном электрическом поле. При этом, несмотря на то, что ввод деэмульгаторов ослабляет бронирующие оболочки капель воды, а нагрев эмульсии снижает вязкость дисперсионной среды

(нефти), сближение и укрупнение капель происходит за счет создания вокруг каждой капли макромасштабной неоднородности электрического поля [4].

Механизм обработки эмульсии в однородном электрическом поле достаточно подробно рассмотрен, например, в [5–10]. Среди недостатков современного уровня технологии такой обработки авторы выделяют: образование при коалесценции дисперсной фазы вторичных капель значительно меньших размеров (так называемая частичная коалесценция) [11], наличие критического значения напряженности электрического поля, выше которого происходит разрушение укрупненных капель [12, 13], объединение капель воды в цепочки, приводящие к короткому замыканию электродов [14], низкая эффективность электрокоалесценции в однородном электрическом поле при расстоянии между каплями на много большем, чем их диаметр [15].

При этом исследователями отмечается возможность интенсификации процесса электрокоалесценции водонефтяных эмульсий путем создания макромасштабного неоднородного электрического поля. По мнению авторов [16], генерация в объеме аппарата равномерного градиента напряженности электрического поля способствует созданию областей повышенной концентрации капель, что приводит к увеличению скорости коалесценции капель и росту темпов расслоения фаз.

С помощью математического моделирования поведения капель воды в неоднородном электрическом поле, созданном конфигурацией плоских электродов различного линейного размера в [17] установлено, что капли воды притягиваются к электроду, имеющему меньший линейный размер, за счет макромасштабной силы диэлектрофореза, генерируемой за счет создания в эмульсии существенно неоднородного электрического поля. Также в результате численного моделирования свободного падения двух капель под действием электрического поля, созданного различными конфигурациями электродов, авторами показана целесообразность применения неоднородного электрического поля, созданного электродной системой в форме трубы Вентури [18].

Вместе с тем стоит отметить, что экспериментальные исследования воздействия на водонефтяную эмульсию неоднородным электрическим полем в литературе представлены весьма ограничено и не дают полной детальной картины эволюции процессов разделения в рассматриваемой смеси.

Так, в [19] выполнено сравнение среднеарифметического диаметра капель при обработке в однородном электрическом поле и обработке в поле, созданном электродной системой «пластина–точка». Установлено, что при обработке в однородном электрическом поле конечный среднеарифметический диаметр капель составляет величину порядка 30 мкм, в то время как в неоднородном электрическом поле – 40 мкм.

Также в [20] в рамках моделей и методов математического и численного моделирования рассматриваемых процессов отмечается, что конфигурация плоских электродов различного линейного размера способствует улавливанию взвешенных в воздухе частиц по идентичному физическому механизму.

Указанные результаты показывают, что задача по оптимизации процесса обезвоживания водонефтяных эмульсий с помощью использования неоднородного электрического поля требует детальной верификации используемых теоретических моделей и систематического экспериментального анализа данных об эффективности обработки таким полем среды с целью сокращения расстояния между каплями воды.

С учетом вышеуказанного в настоящей работе поставлены следующие цели: дать количественную оценку и произвести анализ отклонений отдельных капель воды в масле под действием неоднородного электрического поля различной интенсивности; детально изучить процесс сближения капель воды в водомасляной эмульсии под действием неоднородного электрического поля.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования были выбраны капли воды, претерпевающие свободное падение в масле, а также водомасляные эмульсии различного водосодержания, начального распределения капель по размерам и содержания хлорида натрия в воде.

При проведении экспериментальных исследований использовались следующие материалы:

- масло минеральное (плотность при 15 °С – 878 кг/м³, кинематическая вязкость при 40 °С – 91,4 мм²/с, кинематическая вязкость при 100 °С – 13,9 мм²/с, относительная диэлектрическая проницаемость – 2,4);
- вода питьевая (плотность – 1000 кг/м³, динамическая вязкость при 20 °С – 1,002 мПа·с), относительная диэлектрическая проницаемость – 80,4);
- соль поваренная, приготовленная по ГОСТ Р 51574–2000 «Соль поваренная пищевая. Технические условия».

Плотность раствора хлорида натрия в воде доводили до требуемого значения, а затем воду смешивали с маслом либо использовали для создания отдельных капель воды.

Молярную концентрацию хлорида натрия рассчитывали исходя из известной плотности раствора соли. Измерение веса хлорида натрия и воды до смешивания производили на лабораторных весах с ценой деления 1 г. Приготовление солевого раствора и водомасляной эмульсии производили с использованием лабораторной программируемой механической мешалки ММ-1000. Частоту и длительность перемешивания для приготовления солевого раствора выбирали равной 150 об/мин и

1 мин соответственно. Для приготовления эмульсии данные параметры варьировали, исходя из требуемой степени дисперсности эмульсии, при частоте и времени перемешивания в диапазоне от 60 до 1000 об/мин и 1–5 мин соответственно.

Описание экспериментальной установки

Для проведения экспериментальных исследований была разработана и создана специальная измерительная камера, а также компактно смонтировано регистрационное и вспомогательное оборудование. Общая схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Измерительная камера была изготовлена прямоугольной формы с целью исключения оптических искажений. На задней стенке камеры была нанесена шкала с вертикальными и горизонтальными отметками для корректного расчета диаметра и величины отклонений при движении капель. Размер камеры – 200×30×20 мм, толщина стекла – от 3,5 до 4 мм. Преобладание вертикального размера камеры над горизонтальным обеспечило наблюдение за движением капель под действием силы тяжести в течение продолжительного времени, как до, так и после зоны обработки электрическим полем. Малое поперечное расстояние позволило фиксировать исследуемые эффекты при величине подаваемого на электроды напряжения не более 8 кВ. Электроды были выполнены из оцинкованных стальных пластин шириной 10 мм и толщиной 0,2 мм. Длина протяженного электрода – 80 мм, короткого электрода – 10 мм. Расстояние между электродами h составляло 18 мм. Ввиду того что рамки для электродов были выполнены из

непрозрачного полимерного материала, движение капли вдоль оси аппликат не фиксировалось. В эксперименте длинный электрод – высокопотенциальный, короткий электрод – низкопотенциальный. Полярность электродов в ходе экспериментов не изменялась.

На рис. 2 показано распределение потенциала φ и градиента квадрата напряженности электрического поля ∇E^2 , создаваемого используемой в эксперименте конфигурацией электродов, совмещенное с месторасположением вводимых капель, при подаче на электроды напряжения 5,5 кВ. Указанные распределения получены с использованием подхода, изложенного в [17].

Оптическое оборудование состояло из камеры Canon G16 и источника освещения. Характеристики камеры: разрешение 12.1 мегапикселей, возможность 5-кратного оптического и 4-кратного цифрового приближения, записи видео качеством Full HD, размером изображения 1920×1080 пикселей и частотой кадров от 30 до 240 в минуту.

Электрическое оборудование состояло из источника питания, выпрямительного блока, киловольтметра КВЦ-120 (предел допускаемой основной относительной погрешности измерения действующего значения напряжения постоянного тока 0,25 %), соединительных проводов. Использовался высоковольтный высокоомощный источник питания напряжением до 100 кВ, мощностью 25 кВт.

Эксперимент по изучению динамики одиночных капель воды в масле выполняли в следующей последовательности:

1. В измерительной ячейке жестко закрепляются рамки с электродами.

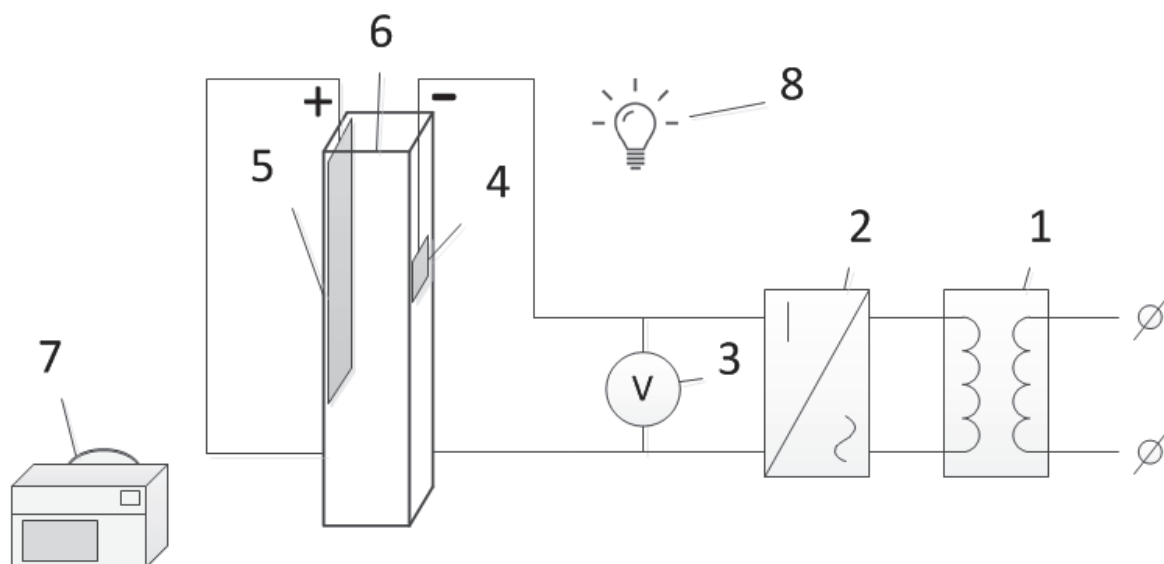


Рис. 1. Общая схема экспериментальной установки: 1 – высоковольтный источник переменного тока; 2 – выпрямительный блок; 3 – киловольтметр; 4 – короткий электрод (катод); 5 – длинный электрод (анод); 6 – измерительная камера; 7 – видеокамера; 8 – источник света

Fig. 1. General scheme of the laboratory setup: 1 is the high voltage AC power source; 2 is the rectifier; 3 is the voltmeter; 4 is the short electrode (cathode); 5 is the long electrode (anode); 6 is the measuring chamber; 7 is the camera; 8 is the light source

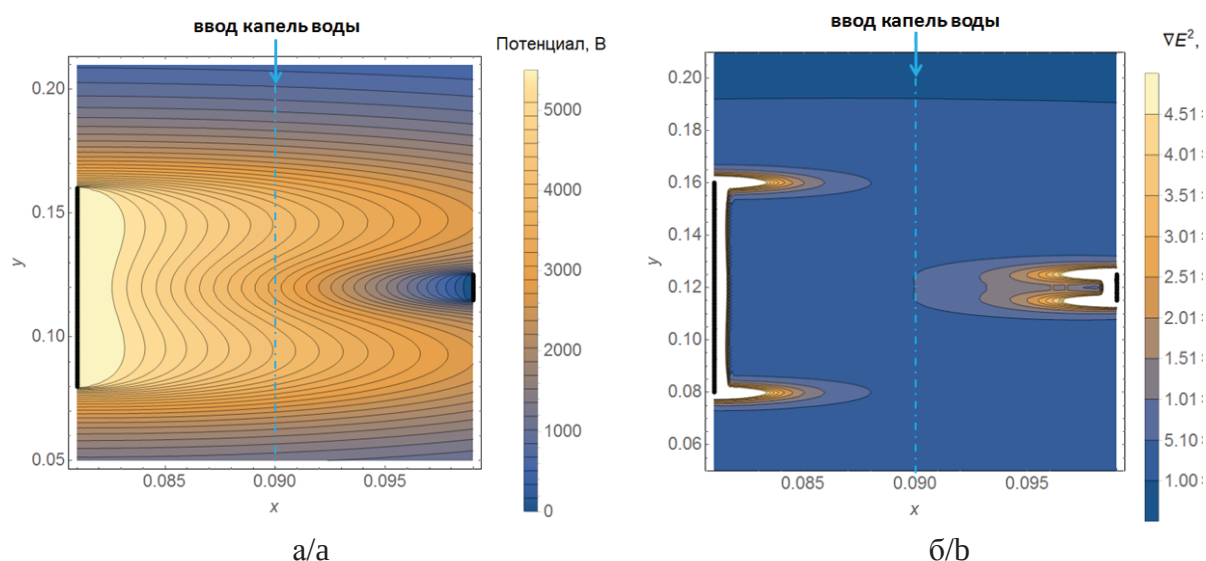


Рис. 2. Распределение параметров электрического поля, создаваемого используемой в эксперименте конфигурацией электродов при подаче напряжения 5,5 кВ: а) потенциал электрического поля φ ; б) градиент квадрат напряженности электрического поля

Fig. 2. Distribution of the electric field parameters at 5,5 kV voltage: a) electric field potential φ ; b) square gradient of electric field intensity

2. В объем аппарата заливается масло.
3. К верху измерительной ячейки устанавливается заполненное водой устройство для ввода капель.
4. Ячейка подключается к высоковольтному оборудованию.
5. Включается камера и производится видеозапись эксперимента.
6. Подается напряжение на электроды.
7. Фиксируются показания киловольтметра.
8. В объем ячейки вводится по одной капле воды.
9. Наблюдается процесс осаждения капли.
10. Повторяется ввод капель до требуемого количества экспериментальных данных.
11. Обесточивается камера и высоковольтное оборудование.
12. Сливаются масло и вода из объема измерительной ячейки и повторно не используются.

Для подачи капель использовалась игла диаметра 0,45 мм. Эксперимент по изучению динамики множества капель воды в масле в составе водомасляной эмульсии проводили в той же последовательности, за исключением этапов 3, 8 и 10. Устройство для ввода капель в таких экспериментах не использовалось – в аппарат заливалась заранее приготовленная эмульсия.

Анализ экспериментальных данных, измерение координат и линейных размеров капель проводились методом цифровой обработки полученных изображений в программном обеспечении ImageJ. При размере изображения 1920×1080 пикселей и разрешением съемки 12 пикселей на миллиметр точность линейных измерений составила 0,083 мм.

Результаты эксперимента

Влияние неоднородного электрического поля на единичную каплю воды

В эксперименте определялись следующие параметры: истинные координаты капли по осям X и Y ; поперечное смещение капли l_x ; диаметр капли d ; напряженность электрического поля в центре межэлектродной области E_0 . Относительное отклонение капель вычислялось как отношение абсолютного отклонения капель от траектории свободного падения по оси абсцисс к половине межэлектродного расстояния $h=18$ мм. Напряженность электрического поля в центре межэлектродной области E_0 вычислялась как отношение напряжения на электродах V к межэлектродному расстоянию h .

Опыты были проведены при стандартных условиях, в диапазоне величины напряженности электрического поля в центре межэлектродной области E_0 от 2,61 до 3,5 кВ/см.

В результате анализа совокупности опытных данных определено, что напряженность электрического поля в центре межэлектродной области E_0 является главным фактором, определяющим динамику поведения капли воды в масле при проведении эксперимента. Сводные результаты эксперимента представлены в табл. 1.

Из результатов, представленных в табл. 1, следует, что в общем случае капля воды испытывает тем большее отклонение, чем больше напряженность поля между электродами. Вместе с тем имеются особенности, на которых следует остановиться подробнее.

Таблица 1. Результаты экспериментальных наблюдений

Table 1. Results of experimental observation

№ опыта Experiment	Напряженность Intensity of electric field E_0 , кВ/см	Диаметр капли Droplet diameter d , мм	Абсолютное отклонение Absolute displacement l_x , мм	Относительное отклонение Relative displacement $l_x/0,5h$, %
1	2,61	2,58	3,34	42
		2,54	2,52	31
		2,83	2,61	33
		2,80	2,76	34
		1,82	1,85	23
2	2,79	3,06	4,97	62
		2,05	2,84	35
		2,13	2,42	30
		2,49	2,59	32
		2,73	2,82	35
3	2,93	3,02	3,55	44
		2,66	3,58	45
		2,83	3,81	48
		3,17	3,67	46
4	3,31	2,84	1,14	14
		2,92	2,53	32
		2,88	1,83	23
		2,21	0,26	3
5	3,5	2,64	4,47	56
		2,88	4,08	51
		2,76	3,98	49
		2,47	5,83	73

В частности, в опытах №№ 1–3, при напряженности электрического поля в центре межэлектродной области 2,61–2,93 кВ/см, капли воды в масле испытывают среднее отклонение в 3 мм от начального (центрального) положения в сторону короткого электрода. Конкретные значения отклонения капли от вертикали зависят от напряжения на электродах, диаметра капли, начального положения. Смещение капли воды в поперечном направлении в динамике представлено на рис. 3.

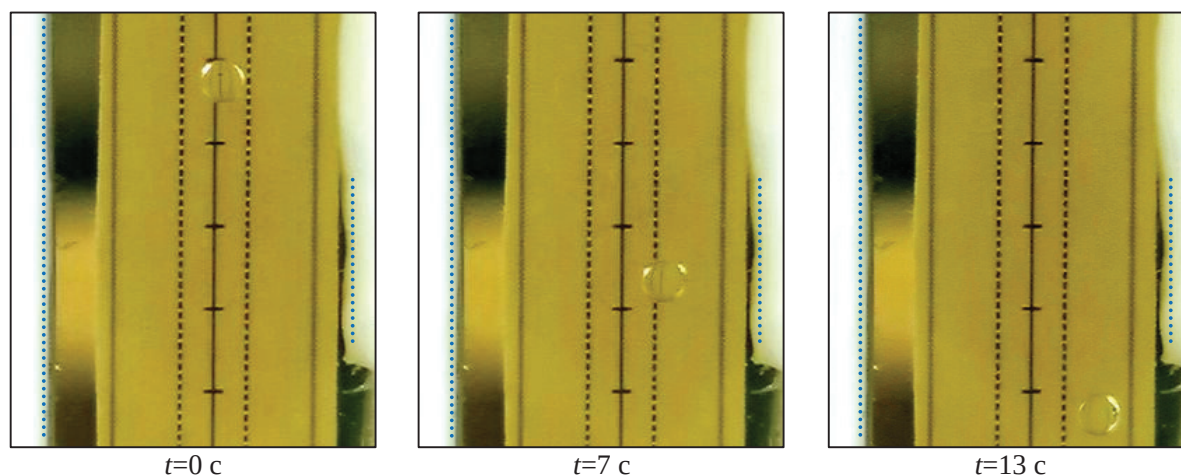


Рис. 3. Картины притяжения капли воды к короткому электроду под действием силы диэлектрофореза, $E_0=2,93$ кВ/см. Синим пунктиром условно указано расположение электродов внутри рамок-держателей

Fig. 3. Dielectrophoretic attraction of water droplets to a short electrode, $E_0=2,93$ kV/cm. Blue dotted line shows the location of electrodes within the frames

На рис. 4 представлено графическое сопоставление среднего отклонения капель пресной воды $\bar{l}_x$ при различной напряженности в центре межэлектродной области E_0 в опытах №№ 1–3.

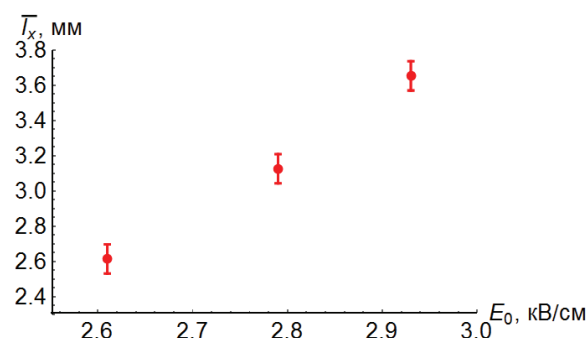


Рис. 4. Зависимость среднего отклонения капли пресной воды $\bar{l}_x$ от напряженности электрического поля в центре межэлектродной области в опытах № 1–3

Fig. 4. Dependence of the average displacement of fresh water drops $\bar{l}_x$ on the electric field intensity in the central interelectrode area in the experiments no. 1–3

На рис. 5 представлено графическое сопоставление отклонения капель пресной воды различного диаметра при различном значении напряженности в центре межэлектродной области E_0 в опытах №№ 1–3.

В опыте № 4 при значении напряженности электрического поля в центре межэлектродной области $E_0=3,31$ кВ/см наблюдается иная картина движения капель воды в масле. Видно, что конечное горизонтальное отклонение, несмотря на рост напряжения, значительно сокращается – вплоть до полного отсутствия (минимальное отклонение 0,2 мм). Причиной такого сокращения является экспериментально наблюдаемый отскок капель при касании короткого электрода.

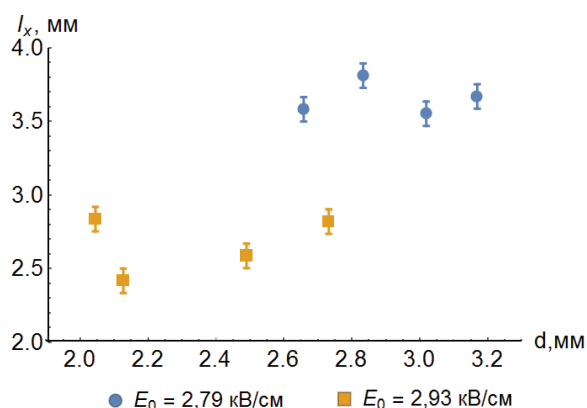


Рис. 5. Зависимость поперечного отклонения капли пресной воды l_x от её диаметра d при различной величине напряженности E_0 : 2,79 и 2,93 кВ/см

Fig. 5. Dependence of fresh water drop displacement l_x on its diameter d . Values of electric field intensity in the central interelectrode area are 2,79 and 2,93 kV/cm

По нашему мнению, причиной отскока является приобретение каплей дополнительного положительного заряда при контакте с коротким электродом. Наличие избыточного положительного заряда создает условия для кулоновского отталкивания капли от короткого электрода. При этом для сообщения капле заряда не требуется её полного касания – при приближении капли к электроду от ближнего к электроду края наблюдается образование «мостика» воды небольших размеров, который существует очень короткое время и служит проводником передачи заряда от электрода к капле. В результате отскока капли такие «мостики» могут являться источником формирования вторичных капель воды гораздо меньших размеров, что может создать дополнительные трудности в технологическом процессе обезвоживания эмульсий.

В опыте № 5 при $E_0 = 3,5$ кВ/см динамика движения капель воды в масле в неоднородном электрическом поле также претерпевает изменения. При данном значении параметров в эксперименте удалось достичь больших значений поперечного смещения капли – среднее значение смещения l_x составляет 4,57 мм. Причиной большего смещения является изменение механизма движения. В частности, при данном значении напряжения наблюдался комбинированный эффект, заключающийся в отскоке и повторном притяжении отскочившей капли. Фотография явления представлена на рис. 6, 7.

Механизм отскока, наблюдаемый в опыте № 5, аналогичен наблюдаемому в опыте № 4: от ближнего к короткому электроду края капли формировался «мостик», после касания которого капля стремительно отталкивалась в противоположную от электрода сторону. Однако в данном опыте после отскока капля продолжала притягиваться к электроду по дуге, при этом принимая эллипсоидную форму. При этом капля неоднократно формировала «мостик» и касалась электрода, колеблясь между фазами отскока и притяжения. Однако каждый раз величина отскока была меньше первоначального значения. Опытами установлено, что процесс колебательного притяжения заканчивается при достижении каплей нижнего края короткого электрода. После этого капля вновь принимает сферическую форму и продолжает свободное падение.

Влияние солёности воды на движение капель в неоднородном электрическом поле

Ввиду того что вода в составе водонефтяной эмульсии содержит некоторое количество солей, было проведено исследование движения капель соленой воды в неоднородном электрическом поле.

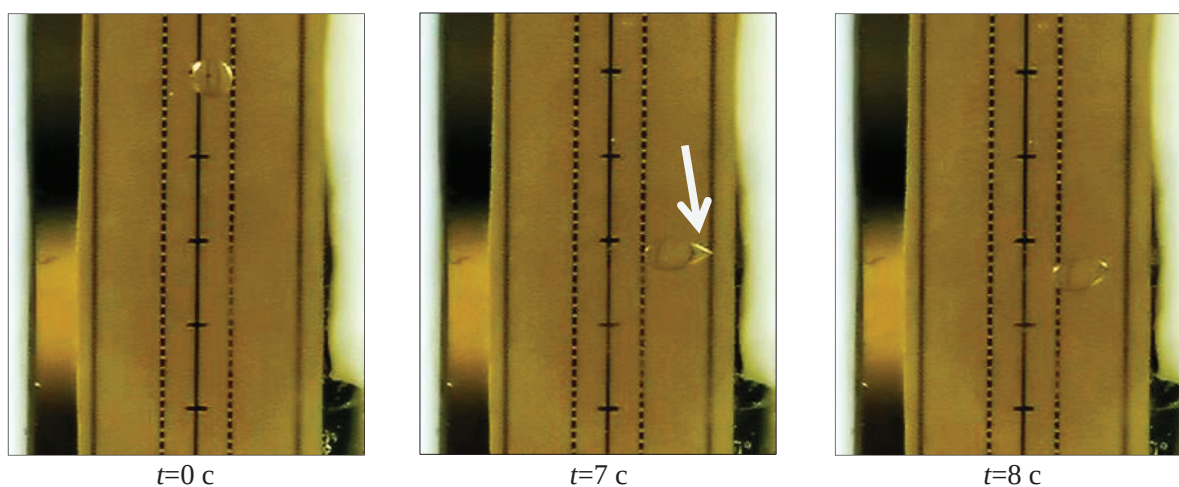


Рис. 6. Картины отскока и повторного притяжения капли воды в масле (фаза притяжения и отскока), $E_0 = 3,5$ кВ/см. Стрелкой указан «мостик», через который происходит заряд капли

Fig. 6. Rebound and re-attraction of water droplet in oil (attraction and rebound phases), $E_0 = 3,5$ kV/cm. Arrow indicates a «bridge» which passes a droplet charge

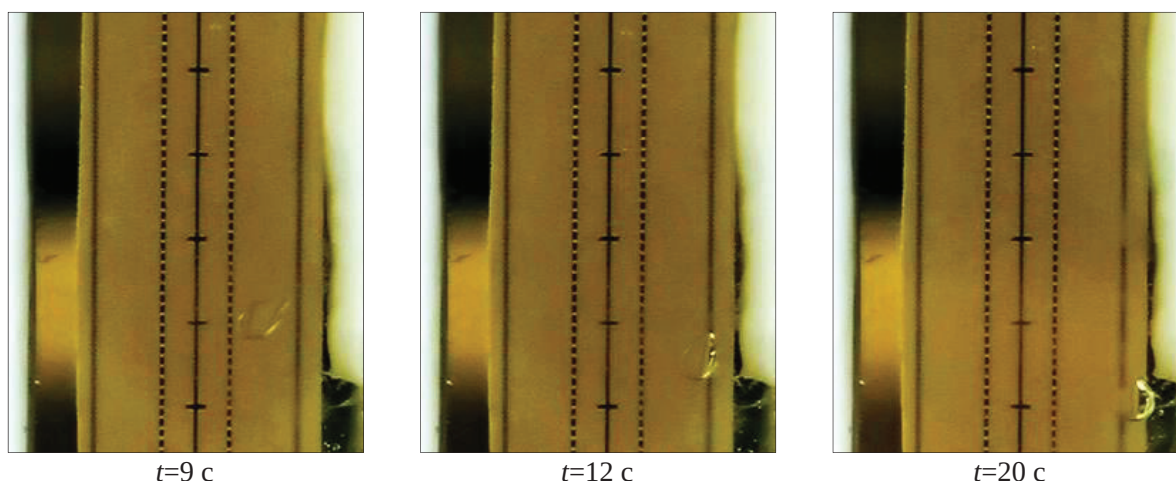


Рис. 7. Картины отскока и повторного притяжения капли воды в масле (фаза повторного притяжения), $E_0=3,5$ кВ/см

Fig. 7. Rebound and re-attraction of water droplet in oil (re-attraction phase), $E_0=3,5$ kV/cm

Для получения соленой воды 100 г пресной воды смешивали с 20 г хлорида натрия (для получения раствора плотностью 1200 кг/м^3), что эквивалентно молярной концентрации раствора хлорида натрия 3,4 моль/литр. Диапазон изменения величины напряженности электрического поля в центре межэлектродной области E_0 в опытах составил от 2,87 до 3,69 кВ/см. Обработанные результаты измерений представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты измерений положения капель раствора хлорида натрия при его обработке в неоднородном электрическом поле

Table 2. Measurements of sodium chloride solution drops position when processing it in inhomogeneous electric field

№ опыта Experiment	Напряженность Electric field intensity E_0 , кВ/см	Диаметр капли Droplet diameter d , мм	Абсолютное отклонение Absolute displacement l_x , мм	Относительное отклонение Relative displacement $l_x/0,5h$, %
1	2,87	2,43	2,52	30
		3,15	1,71	22
		2,79	1,25	15
		3,07	1,65	20
2	3,13	2,76	1,61	19
		2,76	1,96	19
		2,46	1,82	18
		2,98	2,79	27
3	3,69	2,54	1,37	20
		2,94	1,53	17
		2,76	2,51	30
		2,74	1,52	18

Можно отметить, что в рамках эксперимента значение абсолютного отклонения раствора хлорида натрия слабо зависит от вариации, создаваемой напряженностью электрического поля. Графически распределение среднего отклонения капель соленой воды от напряженности электрического поля в центре межэлектродной области E_0 на элек-

троды, в сравнении с аналогичным распределением для пресной воды, представлена на рис. 8.

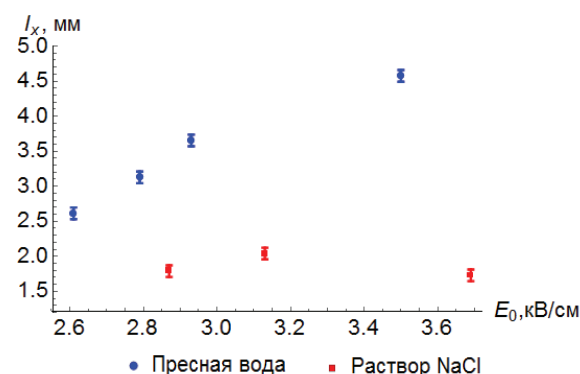


Рис. 8. Изменение величины отклонения капель пресной и соленой воды в неоднородном электрическом поле при различных значениях E_0

Fig. 8. Change in fresh and salt water drops displacement value in non-uniform electric field at different magnitudes of E_0

Из рис. 8 видно, что капли раствора NaCl демонстрируют меньшее среднее значение абсолютного отклонения l_x , а также меньшую зависимость от напряженности электрического поля в межэлектродной области E_0 .

Поведение капель воды в водомасляной эмульсии

Для наглядного представления траектории движения капель воды была приготовлена водомасляная эмульсия с 10%-м объемным содержанием пресной воды (по методике, приведенной выше). В составе эмульсии под действием неоднородного электрического поля было произведено измерение координат пяти капель по осям X , Y с различным начальным положением по горизонтали и вертикали относительно короткого электрода. Начальное и конечное положение капель приведено на рис. 9. Расположение электродов внутри рамок-держателей идентично изображенному на рис. 2.

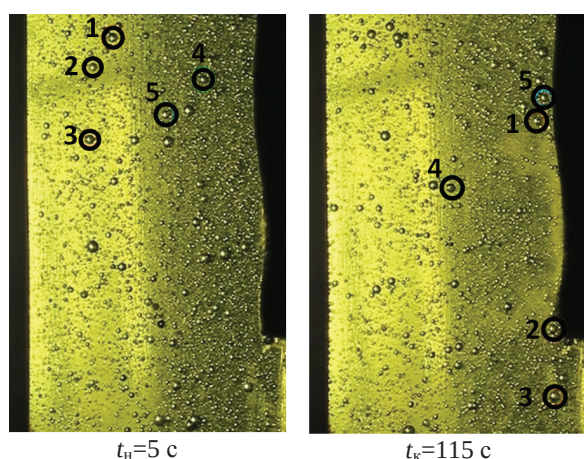


Рис. 9. Картины о начальном и конечном положениях капль воды в масле при обработке в неоднородном электрическом поле для анализа траекторий. $E_0 = 2,78$ кВ/см, ширина изображения 22 мм

Fig. 9. Water droplets position in oil when processing in non-uniform electric field. $E_0 = 2,78$ kV/cm, image width is 22 mm

Измерения проводились в течение 110 секунд, с шагом по времени до подачи напряжения в 10 секунд, после подачи напряжения – 5 секунд. Диаметр исследуемых капль определялся диапазоном от 0,64 до 0,66 мм. В ходе наблюдения, помимо измерения координат, наблюдалось также незначительное изменение формы капль от сферической к эллипсоидной. Во всех случаях измерялась координата центра масс капль.

По измеренным координатам были построены траектории движения капль воды в водомасляной эмульсии под действием неоднородного электрического поля. Траектории движения представлены на рис. 10. В порядке удаленности от электрода капль вели себя следующим образом:

Капль № 1, находящаяся на максимальном горизонтальном расстоянии от короткого электрода, при подаче напряжения на электроды под действием силы диэлектрфореза сместилась в сторону короткого электрода и продолжила вертикальное падение без отскока.

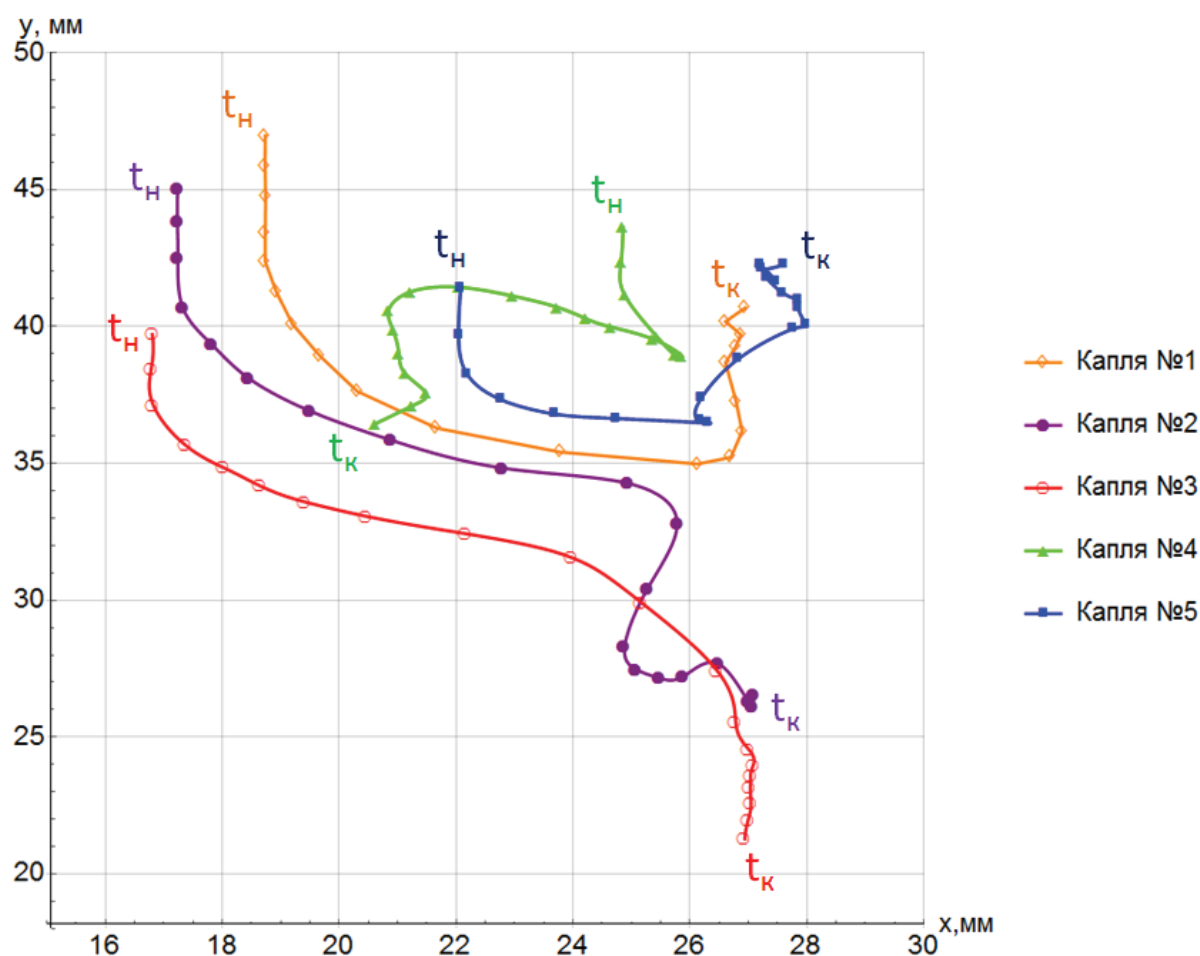


Рис. 10. Траектории движения капль воды в водомасляной эмульсии при обработке неоднородным электрическим полем, где t_n – точка начала наблюдения за движением капль (5 с), t_k – точка конца наблюдения за движением капль (115 с)

Fig. 10. Trajectories of water droplets motion in water-oil emulsions at processing with non-uniform electric field; t_n is the starting point of observation (5 s), t_k is the end point of drop motion observation (115 s)

Капля № 5 при подаче напряжения также сместилась в сторону короткого электрода. При приближении к электроду капля совершила отскок вниз с последующим притяжением и продолжила свободное падение.

Капля № 2 при подаче напряжения сместилась в сторону короткого электрода. При приближении к электроду капля совершила отскок вверх, после чего продолжила движение вверх, против направления силы тяжести.

Капля № 4 при подаче напряжения сместилась в сторону короткого электрода. При приближении к электроду капля совершила отскок вверх, после чего продолжила движение вверх, против направления силы тяжести.

Капля № 3, которая находилась на минимальном расстоянии от короткого электрода, имела отличный от предыдущих капель характер движения. После приближения к короткому электроду на некоторое расстояние капля начала движение в противоположную от электрода сторону – против направления действия силы диэлектрофореза и против направления силы тяжести. После некоторого удаления от короткого электрода капля продолжила вертикальное падение.

По результатам наблюдения траекторий, изображенных на рис. 10, исследуемые капли воды можно разделить по характеру движения на три группы:

- капли № 1 и № 5, которые притягиваются и отклоняются к нижнему краю короткого электрода;
- капли № 2 и № 4, которые притягиваются и отклоняются к верхнему краю короткого электрода;
- капля № 3, притягивающаяся и удаляющаяся от электрода в противоположную сторону.

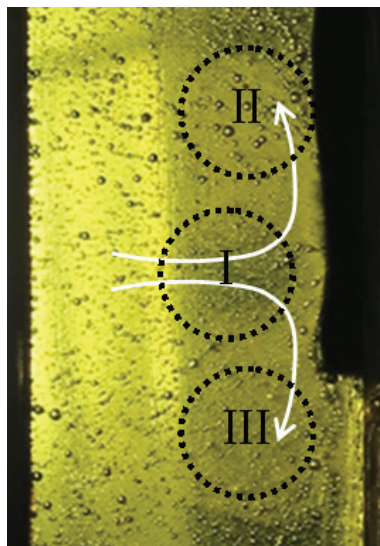


Рис. 11. Специфические зоны, формирующиеся вокруг короткого электрода. Белыми стрелками схематично показано направление движения капель по зонам

Fig. 11. Specific zones around the short electrode. White arrows schematically show the direction of droplets movement in these zones

С целью анализа расположения характерных зон скопления капель воды в водомасляной эмульсии при обработке в неоднородном электрическом поле, а также общей динамики поведения эмульсии как системы производилось наблюдение и фиксация зоны обработки в течение 370 секунд. Напряженность электрического поля в центре межэлектродного пространства составила 2,78 кВ/см. Конечный результат наблюдений представлен на рис. 11.

Из рис. 11 ясно видно формирование трех характерных зон в среде: зоны скопления капель перед коротким электродом (I), зоны выталкивания капель к верхнему краю короткого электрода (II) и зоны выталкивания капель к нижнему краю короткого электрода (III).

Обсуждение результатов

Отдельная капля пресной воды

В результате исследований экспериментальных данных на рис. 4, 5, а также сведений об абсолютных значениях отклонений капель от вертикали, приведенных в табл. 1, можно сделать следующие важные для практики технических приложений выводы.

Во-первых, при обработке водомасляной эмульсии неоднородным электрическим полем, создаваемым конфигурацией плоских пластинчатых электродов различного линейного размера, наблюдается притяжение капель воды в масле к электроду, имеющему меньший линейный размер, за счет наличия вокруг такого электрода областей максимума градиента квадрата напряженности электрического поля ∇E^2 .

Во-вторых, абсолютное значение отклонения капли воды в масле в неоднородном электрическом поле не зависит от её диаметра. Это позволяет распространить полученные результаты на широкий класс водонефтяных эмульсий, в том числе содержащих капли воды диаметром 10–500 мкм. Опытами установлено, что капля воды любого диаметра ускоряется до установившегося значения скорости очень быстро. Все это подтверждает ранее проведенную оценку критерия гомохронности, характеризующего отношение временных масштабов перемещения в объеме цилиндрического конденсатора и установления профиля скорости водной фазы [21].

В-третьих, конечное смещение капель воды нелинейно зависит от напряженности электрического поля. Так, опыты №№ 1–3 при напряженности электрического поля в центре межэлектродной области 2,61–2,93 кВ/см показывают тенденцию равномерного смещения капель воды без касания электрода. В опыте № 4 при подаваемом напряжении в 3,31 кВ/см наблюдается отскок капель воды в противоположную от электрода сторону, что значительно сокращает величину смещения. В опыте № 5 при подаваемом напряжении в 3,5 кВ/см наблюдается отскок и повторное притяжение капель вплоть до границы электрода, что дает максимальное смещение капель.

Отдельная капля раствора NaCl

Анализ данных на рис. 8 и численного сопоставления значений табл. 2 показывает, что отклонение капель раствора хлорида натрия при эквивалентных значениях напряженности в центре межэлектродной области в условиях эксперимента в среднем на 42 % ниже, чем отклонение капель пресной воды.

Установлено, что причиной снижения влияния силы диэлектрорефа на капли раствора хлорида натрия является меньшее значение диэлектрической проницаемости капель раствора по сравнению с диэлектрической проницаемостью капель пресной воды. Исследования [22] показывают, что раствор хлорида натрия концентрации 3,4 моль/литр, используемый в опыте, имеет относительную диэлектрическую проницаемость около 55, что на 30 % ниже, чем относительная диэлектрическая проницаемость пресной воды. Таким образом, отличия между диэлектрическими свойствами дисперсной фазы и дисперсионной среды уменьшаются, что приводит к снижению влияния силы диэлектрорефа.

Капли в водомасляной эмульсии

По результатам анализа вопросов эволюции траекторий капель в водомасляной эмульсии, а также выявления характерных зон, формирующихся вокруг короткого электрода, можно сделать следующие выводы.

Зона I перед коротким электродом является зоной притяжения и кратковременного скопления капель воды. Капли захватываются неоднородным электрическим полем, создаваемым электродами различного линейного размера, притягиваются в зону I, касаются электрода и, в зависимости от своего положения, отталкиваются либо в зону II, либо в зону III, которые являются зонами максимума градиента квадрата напряженности электрического поля ∇E^2 . В зоне I фиксировалось лишь поступательное движение капель к электроду. Коалесценции капель не наблюдалось либо её темпы были незначительны.

Зона II у верхнего края короткого электрода является зоной максимума градиента квадрата напряженности электрического поля ∇E^2 . Капли, прошедшие зону I, коснувшиеся электрода и находящиеся ближе к верхнему краю электрода, претерпевают отскок вверх и притяжение в зону II. Там в течение продолжительного времени происходит скопление и захват капель по следующему механизму: капли отскакивают вверх, коалесцируют и образуют вытянутые вдоль направления линий напряженности электрического поля цепочки. Цепочка капель под действием силы тяжести стремится вниз, частично разрушается и повторно попадает в зону I, повторяя приведенный выше цикл. Зону II можно охарактеризовать как зону наибольшей концентрации капель воды в масле при обработке в неоднород-

ном электрическом поле, поскольку капли здесь задерживаются наиболее продолжительное время. В данной зоне наблюдается активная коалесценция капель воды.

Зона III у нижнего края короткого электрода также является зоной максимума градиента квадрата напряженности электрического поля ∇E^2 , однако здесь, ввиду совпадения направления отскока и силы тяжести, механизм поведения капель отличается от зоны II. Капли, прошедшие зону I, коснувшиеся электрода и находящиеся ближе к нижнему краю электрода, претерпевают отскок и притяжение вниз, в зону III, образуя при этом единую вертикально ориентированную цепочку. Длина цепочки увеличивается при поступлении в неё новых капель. При достижении некоторой критической длины крайняя нижняя капля цепочки, не испытывая более притяжения к короткому электроду и другим каплям за счет действия силы диэлектрорефа, отделяется от цепочки и оседает на дно аппарата. Цикл повторяется при добавлении новых капель в цепочку. Таким образом, в зоне III реализуется полное осаждение капель на дно аппарата. Скопление капель более плотное, чем в зоне I, но ниже, чем в зоне II. В данной зоне наблюдается активная коалесценция капель воды.

Заключение

Таким образом, результаты исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. В неоднородном электрическом поле, создаваемом конфигурацией плоских пластинчатых электродов различного линейного размера, капли воды в масле притягиваются к электроду, имеющему меньший линейный размер, при этом относительное отклонение капли нелинейно зависит от напряженности электрического поля. Наблюдаются три схемы притяжения капель: простое притяжение без касания; притяжение с касанием и отскоком капли; притяжение с касанием, отскоком и повторным притяжением капли. В первом случае среднее относительное отклонение капли составило 46 % при напряженности электрического поля в центре межэлектродного пространства 2,93 кВ/см, во втором случае – 18 % при напряженности 3,31 кВ/см, в третьем случае – 57 % при напряженности 3,5 кВ/см.
2. Содержание солей в промывочной воде отрицательно сказывается на эффективности обработки неоднородным электрическим полем. Отклонение капель раствора хлорида натрия молярной концентрации 3,4 моль/литр к короткому электроду, при эквивалентных значениях напряженности электрического поля, в среднем на 42 % ниже, чем отклонение капель пресной воды.
3. При длительной обработке водомасляной эмульсии в неоднородном электрическом поле

выделяются три характерных зоны скопления капель вокруг короткого электрода: зона притяжения в центре электрода, две зоны выталкивания и скопления капель по краям электрода. Характер движения капель в каждой из зон различен и может быть учтен при проектирова-

нии формы современных электродных систем аппаратов, реализующих обработку водонефтяных эмульсий в электрическом поле, а также для внесения дополнений в математические модели о прогнозе механизмов разделения водонефтяных эмульсий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байков Н.М., Колесников Б.В., Челпанов П.И. Сбор, транспорт и подготовка нефти. – М.: Недра, 1975. – 317 с.
2. Эмульсии нефти с водой и методы их разрушения / Д.Н. Левченко, Н.В. Бергштейн, А.Д. Худякова, Н.М. Николаева. – М.: Химия, 1967. – 200 с.
3. ГОСТ Р 51858–2002. Нефть. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2002. – 12 с.
4. Eow J.S., Mojtaba Ghadiri. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the technology // Chemical Engineering Journal. – 2002. – № 85. – P. 357–368.
5. Atten P., Lundgaard L., Berg G. A simplified model of electrocoalescence of two close water droplets in oil // Journal of Electrostatics. – 2006. – № 64. – P. 550–554.
6. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the current understanding / J.S. Eow, M. Ghadiri, A.O. Sharif, T.J. Williams // Chemical Engineering Journal. – 2001. – № 84. – P. 173–192.
7. Less S., Vilagines R. The electrocoalescers' technology: advances, strengths and limitations for crude oil separation // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2012. – № 81. – P. 57–63.
8. Eow J.S., Ghadiri M. Drop-drop coalescence in an electric field: the effects of applied electric field and electrode geometry // Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects. – 2003. – № 219. – P. 253–279.
9. Atten P. Electrohydrodynamics of dispersed drops of conducting liquid: from drops deformation and interaction to emulsion evolution // International Journal of Plasma Environmental Science & Technology. – 2013. – № 7. – P. 2–12.
10. Electrostatic phase separation: a review / S. Mhatre, V. Vivacqua, M. Ghadiri, A.M. Abdullah, M.J. Al-Marri, A. Hassanpour, B. Hewakandamby, B. Azzopardi, B. Kermani // Chemical Engineering Research and Design. – 2015. – № 96. – P. 177–195.
11. Electrophoretically mediated partial coalescence of a charged microdrop / R. Pillai, J.D. Berry, D.J. Harvie, M.R. Davidson // Chemical Engineering Science. – 2016. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250916303888> (дата обращения: 22.07.2016).
12. Electrocoalescence behavior of two identical droplets with various droplet radii / B.B. Wang, X.D. Wang, T.H. Wang, W.M. Yan // Applied Thermal Engineering. – 2016. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116307463> (дата обращения: 21.05.2016).
13. Changhui G., Limin H. Coalescence behaviour of two large water-drops in viscous oil under a DC electric field // Journal of Electrostatics. – 2014. – № 72. – P. 470–476.
14. Effects of high-frequency and high-voltage pulsed electric field parameters on water chain formation / B. Li, S. Zhiqian, W. Zhenbo, J. Youhai, F. Yuxin // Journal of Electrostatics. – 2016. – № 80. – P. 22–29.
15. Demulsification techniques of water-in-oil and oil-in-water emulsions in petroleum industry / R. Zolfaghari, A. Fakhru'l-Razi, A.C. Luqman, S. Elnashaie // Separation and Purification Technology. – 2016. – № 170. – P. 377–407.
16. Панченков Г.М., Цабек Л.К. Поведение эмульсий во внешнем электрическом поле. – М.: Химия, 1969. – 190 с.
17. Харламов С.Н., Зайковский В.В. Математическое моделирование влияния неоднородного электрического поля на движение капель воды в нефти // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2015. – № 4. – С. 95–117.
18. Таранцев К.В., Красная Е.Г., Коростелева А.В. Моделирование процесса электрокоалесценции капель воды в нефти при различной геометрии электродов // Известия Пензенского государственного педагогического университета им. В.Г. Белинского. – 2011. – № 26. – С. 641–645.
19. Mhatre S., Thaokar R. Electrocoalescence in non-uniform electric fields: an experimental study // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2015. – № 96. – P. 28–38.
20. Chen Z., Shen X. Study on dielectrophoretic deposition of airborne particles in a vertical micro channel // Building and Environment. – 2010. – № 45. – P. 968–975.
21. Харламов С.Н., Зайковский В.В. Оценка влияния нестационарных процессов при моделировании электрокоалесценции водонефтяных эмульсий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 4. – С. 268–272.
22. Gavish N., Promislow K. Dependence of the dielectric constant of electrolyte solutions on ionic concentration – a microfield approach // Physical Review E. – 2016. – № 94. – P. 1–7.

Поступила 01.09.2016 г.

Информация об авторах

Зайковский В.В., аспирант кафедры транспорта и хранения нефти и газа Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Харламов С.Н., доктор физико-математических наук, профессор кафедры транспорта и хранения нефти и газа Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Муратов В.М., кандидат технических наук, заведующий лабораторией № 11 Института физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 532.529.5, 532.54

EXPERIMENTAL STUDY OF WATER-IN-OIL EMULSION DESTABILIZATION IN NONUNIFORM ELECTRIC FIELD

Vsevolod V. Zaykovskiy¹,

alkast@tpu.ru

Sergey N. Kharlamov¹,

felic@tpu.ru

Vasily M. Muratov¹,

vmm@tpu.ru

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

The relevance of the research is caused by the necessity to improve the quality of oil preparation and processing, and decrease of water content in crude oil incoming the oil refining factories, as well as by the expediency of expanding the experimental data bank on regularities of water drops dynamics in heterogeneous media, such as water-in-oil emulsions, at their processing by non-uniform electric field. The data are rather relevant at the development of theoretical transfer models in mixtures. They are considerably valuable and useful in issues of improving the intensification techniques for phased and component separation of emulsion composition and at the development of technical decisions about perfection of devices for water-oil emulsion separation.

The aim of the research is the experimental study of separate water drops deflection in oil from a vertical surface under the influence of non-uniform electric field at different intensities; and the analysis of water drops spatial distribution in emulsion at such processing.

Research techniques: observation and analysis of motion of separate drops in salty and fresh water, and drops as a part of emulsion in the observational mesh affected by the electric field generated by flat electrodes of different linear dimensions.

Results. It is shown that the relative deviation of a drop to a short electrode depends nonlinearly on the electric field strength in the center of area between electrodes. So the average relative deviation of drops makes 33–46 % at electric field strength of 2,61–2,93 kV/cm. The rebound of water drops to the opposite side from electrode is observed at the strength of 3,31 kV/cm and the deviation is reduced to 18 %. The rebound and repeated attraction of drops up to electrode boundary is observed at the strength of 3,5 kV/cm. It gives maximum displacement of drops on the average on 57 %. The content of sodium chloride salts of 3,4 mole/liter concentration in flushing water affects negatively the effectiveness of processing with non-uniform electric field. It is ascertained that deflection of salty drops is at the average 42 % lower, than the one of drops in fresh water. It was determined as well that the drops are accumulated around a short electrode in three zones. The character of drop motion is different in each of them. It may be used for optimization of electrode form in the devices implementing processing in non-uniform electric field.

Key words:

Crude oil treatment, water-in-oil emulsion, electric field, salt content, droplet diameter.

REFERENCES

1. Baykov N.M., Kolesnikov B.V., Chelpanov P.I. *Sbor, transport i podgotovka nefiti* [Gathering, transport and preparation of oil]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 317 p.
2. Levchenko D.N., Bergshtein N.V., Khudyakova A.D., Nikolaeva N.M. *Emulsii nefiti s vodoy i metody ikh razrusheniya* [Water-oil emulsion and methods of their destruction]. Moscow, Khimiya Publ., 1967. 200 p.
3. GOST R 51858–2002. *Neft. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [State Standart 51858–2002. Crude petroleum. General specifications]. Moscow, Standartinform, 2002. 12 p.
4. John S. Eow, Mojtaba Ghadiri. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the technology. *Chemical Engineering Journal*, 2002, no. 85, pp. 357–368.
5. Atten P., Lundgaard L., Berg G. A simplified model of electrocoalescence of two close water droplets in oil. *Journal of Electrostatics*, 2006, no. 64, pp. 550–554.
6. Eow J.S., Ghadiri M., Sharif A.O., Williams T.J. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the current understanding. *Chemical Engineering Journal*, 2001, no. 84, pp. 173–192.
7. Less S., Vilagines R. The electrocoalescers' technology: Advances, strengths and limitations for crude oil separation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, no. 81, pp. 57–63.
8. Eow J.S., Ghadiri M. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the technology. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 2003, no. 219, pp. 253–279.
9. Atten P. Electrohydrodynamics of dispersed drops of conducting liquid: from drops deformation and interaction to emulsion evolution. *International Journal of Plasma Environmental Science & Technology*, 2013, no. 7, pp. 2–12.
10. Mhatre S., Vivacqua V., Ghadiri M., Abdullah A.M., Al-Marrari M.J., Hassanpour A., Hewakandamby B., Azzopardi B., Kermani B. Electrostatic phase separation: a review. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, no. 96, pp. 177–195.
11. Pillai R., Berry J.D., Harvie D.J., Davidson M.R. Electrophoretically mediated partial coalescence of a charged microdrop. *Chemical Engineering Science*, 2016. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250916303888> (accessed 22 June 2016).
12. Wang B.B., Wang X.D., Wang T.H., Yan W.M. Electrocoalescence behavior of two identical droplets with various droplet radii. *Applied Thermal Engineering*, 2016. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116307463> (accessed 21 May 2016).
13. Changhui G., Limin H. Coalescence behaviour of two large water-drops in viscous oil under a DC electric field. *Journal of Electrostatics*, 2014, no. 72, pp. 470–476.

14. Li B., Zhiqian S., Zhenbo W., Youhai J., Yuxin F. Effects of high-frequency and high-voltage pulsed electric field parameters on water chain formation. *Journal of Electrostatics*, 2016, no. 80, pp. 22–29.
15. Zolfaghari R., Fakhru'l-Razi A., Luqman A.C., Elnashaie S. Demulsification techniques of water-in-oil and oil-in-water emulsions in petroleum industry. *Separation and Purification Technology*, 2016, no. 170, pp. 377–407.
16. Panchenkov G.M., Tsabek L.K. *Povedenie emulsii vo vneshnem elektricheskom pole* [Behavior of emulsion in external electric field]. Moscow, Khimiya Publ., 1969. 190 p.
17. Kharlamov S.N., Zaykovskiy V.V. Mathematical modeling of nonuniform electric field influence on water droplets motion in oil. *Oil and Gas business journal*, 2015, no. 4, pp. 95–117. In Rus.
18. Tarantsev K.V., Krasnaya E.G., Korosteleva A.V. Modelirovanie protsessov elektrokoalesentsii kapel vody v nefiti pri razlichnoy geometrii elektrodov [Modeling water drops electrocoalescence in oil at different electrodes geometry]. *Izvestiya Penzenskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. V.G. Belinskogo*, 2011, no. 26, pp. 641–645.
19. Mhatre S., Thaokar R. Electrocoalescence in non-uniform electric fields: an experimental study. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2015, no. 96, pp. 28–38.
20. Chen Z., Shen X. Study on dielectrophoretic deposition of airborne particles in a vertical micro channel. *Building and Environment*, 2010, no. 45, pp. 968–975.
21. Kharlamov S.N., Zaykovskiy V.V. Otsenka vliyaniya nestatsionarnykh protsessov pri modelirovanii elektrokoalesentsii vodonosnykh emulsiy [Assessment of impact of non-stationary processes when simulating water-oil emulsion electrocoalescence]. *Gorniy informacionno-analiticheskii bulletin*, 2013, no. 4, pp. 268–272.
22. Gavish N., Promislow K. Dependence of the dielectric constant of electrolyte solutions on ionic concentration – a microfield approach. *Physical Review E*, 2016, no. 94, pp. 1–7.

Received: 1 September 2016.

Information about the authors

Vsevolod V. Zaykovskiy, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey N. Kharlamov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vasiliy M. Muratov, Cand. Sc., head of the laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 556.56: 551.345:551.583:56.074.6(571.1)

ДЕТАЛЬНАЯ СТРАТИГРАФИЯ И ДИНАМИКА ХАСЫРЕЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЯМАЛА В ВЕРХНЕМ ГОЛОЦЕНЕ

Прейс Юлия Ивановна¹,
preisyui@rambler.ru

Симонова Галина Владимировна¹,
preisyui@rambler.ru

Слагода Елена Адольфовна^{2,3,4},
eslagoda@ikz.ru

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 10/3.

² Институт криосферы Земли СО РАН,
Россия, 625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86.

³ Тюменский государственный университет,
Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6.

⁴ Тюменский индустриальный университет,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

Актуальность работы обусловлена недостаточной изученностью стратиграфии и динамики болот тундровой зоны Западной Сибири и влияния на них геокриологических условий и климата.

Цель работы: детальное исследование стратиграфии торфяных отложений и реконструкция динамики растительных сообществ, водных режимов и криологических условий верхнеголоценового хасырея Центрального Ямала.

Методы исследования: детальные (с шагом 1...3,5 см) исследования свойств и радиоуглеродное датирование (6 дат) торфяных отложений; реконструкция динамики фитоценозов и водных режимов традиционными палеоэкологическими методами, реконструкция палеокриологических условий по сукцессиям палеофитоценозов и вторичному диагенезу торфов; сравнительный анализ полученных данных с данными реконструкций климата, динамики и криогенного состояния болот других зон и регионов.

Результаты. Впервые для болот тундры Западной Сибири получена детальная стратиграфия торфяных отложений, данные по плотности торфа и его органического вещества. На примере хасырея в районе озера Сохонто Центрального Ямала выявлено влияние палеокриологических условий на повышение степени разложения и плотности торфа. Выполнена детальная реконструкция динамики хасырея за 1300-летний период. Выявлено 7 крупных этапов и 15 стадий с 6 подстадиями развития хасырея внутривекового и векового масштабов. Наиболее влажными были поверхности хасырея 952...843, 273 кал. л. н....2001 г.; максимально дренированными: 1099...1065, 1037...984, 719...652, 542...434 кал. л. н. Высока вероятность кратковременного формирования низких многолетнемерзлых бугров пучения: 1099...1065, 1008...984 и 719...652 кал. л. н. Формирование полигонального торфяника происходило 542...434 кал. л. н. С 434 кал. л. н. увеличилась глубина сезонного протаивания, а с 330 кал. л. н. началось вытаивание ледяных жил, термокарст и эрозия обусловили образование торфяника с выпуклыми остаточными полигонами. В период 136...91 кал. л. н. глубина сезонного протаивания уменьшалась. Обсыхание поверхности хасырея также происходило вследствие сброса вод озера в теплые влажные периоды между 1153 и 1099, 869 и 843 кал. л. н., 2003 и 2008 гг. Водные режимы и геокриологические условия этих стадий хорошо согласуются с аналогичными данными реконструкций болот лесной зоны Западной Сибири и болот криолитозоны Голарктики, а также регионального климата. Выявлено, что в тундре Западной Сибири, в отличие от более южных зон, изменение климата является главной причиной пульсирующего характера развития хасыреев. Климат влиял непосредственно, через гидротермический режим, и косвенно, через криогенные процессы в торфяных отложениях и уловный режим озера. Оптимальные условия для формирования бугров пучения и полигонально-жилых льдов создавались в хасыреях тундровой зоны при возрастании континентальности климата и летних температур в периоды сухих похолоданий.

Ключевые слова:

Торфяная залежь, реконструкция, фитоценоз, водный режим, многолетняя мерзлота, климат, голоцен, тундра, Западная Сибирь.

Введение

В свете современных глобальных изменений климата актуальными являются прогнозы изменения природных ландшафтов на ближайшие столетия. Особенно актуальны прогнозы для наиболее чувствительных природных ландшафтов арктических и субарктических регионов. Это связано с активизировавшимися в настоящее время процесса-

ми деградации многолетней мерзлоты (ММ), усложняющими освоение этих регионов и создающими угрозу массового выброса содержащегося под мерзлотой углекислого газа и метана [1, 2]. Для разработки прогнозов необходимы высокоразрешающие палеоэкологические реконструкции на основе долговременных рядов данных по комплексу высокочувствительных индикаторов. Поэтому во

всем мире ведутся детальные палеоэкологические исследования болот [3–6]. Однако в тундре Западной Сибири такие исследования не проводились.

Сосредоточение месторождений нефти и газа в северных районах Сибири обуславливает необходимость строительства надежных нефте- и газопроводов, дорог, взлетных полос аэродромов в неблагоприятных грунтовых условиях. Пучение минеральных и торфяных грунтов – один из самых опасных процессов для этих длительно существующих линейных сооружений. Несмотря на многочисленные исследования стратиграфии, динамики и генезиса многолетнемерзлых бугров (ММБ) пучения, результаты которых обобщены на мировом уровне [7], остается актуальным вопрос определения региональных и зональных особенностей условий окружающей среды, оптимальных для проявления криогенных процессов в грунтах. В связи с суровым климатом в криолитозоне Западной Сибири процессы промерзания, пучения торфяных отложений и формирования повторно-жильных льдов происходили даже и при потеплении климата [8, 9], в оптимум голоцена [8].

В тундре и лесотундре Западной Сибири ММБ приурочены в основном к хасыреям – осушенным озерным котловинам, которые являются одним из основных ландшафтов этих зон. Для хасыреев характерны частые изменения режимов увлажнения и геокриологических условий в связи с периодическим наполнением и спуском озер, что делает их оптимальным объектом для палеоэкологических исследований. Развитие хасыреев, также как и бугристых болот, происходит циклично [10], но степень климатической обусловленности изменения их функционального состояния в подзонах криолитозоны разная и до конца не выявлена. Так, в северной тайге процессам многолетнего промерзания и пучения в значительной степени способствует формирование биогенного микрорельефа из сфагновых мхов [11]. Выявленные на бугристых болотах сукцессионные ряды, по предположению авторов [10], подтверждают гипотезу естественного саморазвития бугристых болот, а также их комплексов в районах прерывистого распространения ММ в грунтах. Хасыреи являются частью естественного цикла развития этих комплексов, но их образование не является непрерывным и равномерным во времени. Были периоды, во время эпохи потепления климата, более интенсивного дренажа озер и соответствующего развития хасыреев [10]. В арктических тундрах термокарстовые озера тоже очень динамичны с точки зрения жизненного цикла [12], который включает стадии инициирования, расширения, дренажа и повторного инициирования [13]. Согласно [14], развитие термокарстового озера и его осушение происходит под влиянием климата, однако необходимо учитывать и роль локальных факторов [15], так как от них в значительной степени зависит срок наступления стадий жизненного цикла [16].

Не до конца выяснены вопросы и о палеоклимате голоцена этой зоны. Характеристики среднегодовой температуры и суммы осадков практически отсутствуют. Для юга п-ва Ямал дендрохронологическим методом по радиальному приросту лиственницы реконструированы данные высокого разрешения только среднелетней температуры [17].

Цель работы – детальное исследование стратиграфии торфяных отложений и реконструкция динамики растительных сообществ, водных режимов, геокриологических условий и торфонакопления верхнеголоценового хасырея Центрального Ямала.

Объекты и методы исследования

Район исследования находится на Центральном Ямале (рис. 1, а), в зоне сплошного распространения ММ пород с температурами $-5...-7^{\circ}\text{C}$ [18], на границе типичных и южных тундр. Климат суровый. Согласно данным многолетних наблюдений на метеостанции г. Салехарда [19], зима холодная, длится около восьми месяцев, минимальные температуры опускаются до -59°C . Лето короткое, умеренно прохладное. Наиболее теплый месяц – июль, в это время температура может повышаться до $+30^{\circ}\text{C}$. Значительно варьируют как показатели среднегодовой температуры воздуха: от $-1,0$ до $-9,5^{\circ}\text{C}$ (1924–2009 гг.), так и годового количества атмосферных осадков: от 315 до 903 мм (1966–2010 гг.).

В районе оз. Сохонто и среднего течения р. Юрибей (рис. 1, а) хасыреи занимают до 54 % площади [20]. Изученный хасырей диаметром 300...350 м (рис. 1, б) расположен на III террасе Ямала, в районе оз. Сохонто ($69^{\circ}08'57,17''$ с. ш., $70^{\circ}15'57,67''$ в. д.). В центре он имеет заболоченное понижение диаметром 80...100 м, заросшее пушицей, вейником и осокой, с остаточным озером глубиной 2,0...2,5 м, из которого вытекает ручей. На поверхности хасырея, сложенной торфом, выражены разделенные плоскими канавами выпуклые полигоны размером 3...5 м. На полигонах, осложненных мелкими кочками, произрастают карликовая березка (*Betula nana*), багульник стелющийся (*Ledum decumbens*), брусника (*Vaccinium vitis-idaea*), морошка (*Rubus chamaemorus*), пушица шейхцера (*Eriophorum scheichzeri*), осока редкоцветковая (*Carex rariflora*). Напочвенный покров из сфагновых топяных (*Sphagnum majus*, *S. balticum*, *S. squarrosum*) и гипновых (*Polytrichum juniperinum*, *Dicranum angustum*, *Oncophorus wahlenbergii*, *Aulacomnium palustre*) мхов, разреженный. Встречаются пятна торфа без мохового покрова.

Определение свойств и возраста торфяных отложений хасырея

В расчистке Sh-4a-14 западного берега хасырея, возвышающегося над заболоченным днищем на 2,0...2,5 м, отобран монолит торфа размером 17,5×20×80 см и разделен на образцы с шагом

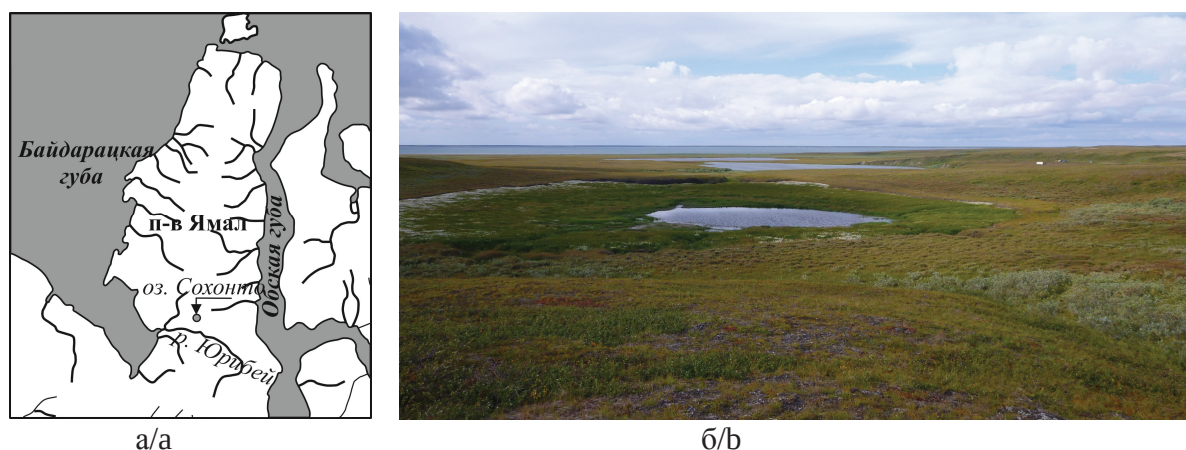


Рис. 1. Район исследований (а) и хасырей с остаточным озером в верховьях термокарстово-эрозионной долины, впадающей в оз. Сохонто (б)

Fig. 1. Study area (a) and khasyreys with the remainder lake at the top of thermokarst-erosion valley which flows into the lake Sokhonto (b)

0,5...3,5 см. Как и ранее [21], традиционными методами выполнены исследования ботанического состава, степени разложения (R), зольности (A), плотности (P) торфа. Жидкостно-сцинтилляционным методом с использованием спектрометра-радиометра Quantulus 1220 (ТомЦКП) получено 6 радиоуглеродных дат. Расчет калиброванного возраста выполнен по программе Calib 7.0.4. [22, 23] в системе В.Р. (Before Present) от 1950 г. (таблица).

Таблица. Радиоуглеродный и калиброванный возраст образцов торфа торфяного разреза Хасырей

Table. Radiocarbon and calibrated age of peat samples of Khasyreys section

Глубина, см Depth, cm	Возраст ^{14}C , лет назад от 1950 г. Age ^{14}C yr B.P.	Материал Material	Лабораторный номер Laboratory number	Калиброванный возраст, лет назад от 1950 г. Calibrated age, yr B.P.	
				2 σ диапазон 2 σ range	Среднее значение Median value
13,5...16,0	113 $\pm$ 1	Торф	ИМКЭС-14C805	118...65	91,5
26,5...28,0	286 $\pm$ 67		ИМКЭС-14C789	501...267	384
35,5...39,0	639 $\pm$ 86		ИМКЭС-14C847	709...514	611,5
43,5...45,5	761 $\pm$ 51		ИМКЭС-14C785	786...651	718,5
70...72	1156 $\pm$ 122		ИМКЭС-14C861	1299...899	1099
79...80	1377 $\pm$ 75		ИМКЭС-14C782	1415...1172	1293,5

Послойный возраст торфяной залежи рассчитан по кумулятивной массе органического вещества (ОВ) торфа каждого слоя и суммарной кумулятивной массе слоя между калиброванными радиоуглеродными датами.

Методы реконструкции динамики болот

Реконструкция палеофитоценозов основана на видовом составе растительных остатков торфа, отражающих их доминантное ядро. Для количественной оценки изменения водного режима палеоэкопотоков методами стандартных экологических шкал по ботаническому составу торфа проведены расчеты ступеней увлажнения (СУ) [24, 25] и индекса влажности (IW) [26] в относительных единицах меры напряженности экологического фактора, ступенях. Некоторым растениям субарктики, отсутствующим в [24–26], были присвоены значения СУ и IW с учетом принадлежности их к определенным экологическим группам по отношению к условиям увлажнения [27, 28]. Субгидрофитам: *Carex rotundata* и *Eriophorum scheichzeri*, присвоены ступени СУ – 93, IW – 6, гидромезофитам: *Carex rariflora* и *Sphagnum lenense* – СУ – 84, IW – 4, мезофитам: *Polytrichum juniperinum* – СУ – 66, IW – 2, *Dicranum angustum* и *Oncophorus wahlenbergii* – СУ – 73, IW – 2,5. Для *Sphagnum squarrosum*, являющегося в криолитозоне типичным доминантом рыхлых сплавин термокарстовых озер, изменена ступень IW на 8. В качестве дополнительных индикаторов водного режима использовались показатели свойств торфа R и P . Вторичный диагенез торфов выявлялся по несогласованности изменения по глубине залежи показателей их свойств, IW, СУ, $V_{\text{пр}}$ торфа. Так, высокие R , P и низкая $V_{\text{пр}}$ торфов при высоких IW и СУ свидетельствуют о вторичном разложении и уплотнении торфов, отлагавшихся в сильно обводненных условиях.

Палеогеоэкологические условия оценивались по характеру сукцессий палеофитоценозов [7] и свойствам торфа [29]. Наличие в прошлом процессов пучения в торфяных отложениях диагностировали по появлению остатков видов растений, отражающих переход поверхности болота из субаквальных в субаэральные условия [7], а высоту ММБ пучения – на основании данных о зависимо-

сти от нее видового состава растительных сообществ [30]. О начале деградации ММ хорошо дренированных поверхностей судили по появлению остатков более гидрофильных растений, а о существовании в прошлом озера – по обилию остатков диатомовых водорослей. Влияние спуска озера диагностировалось по признакам обсыхания поверхности хасырея во влажные и/или теплые периоды климата.

Определение изменения климатических условий в период развития хасырея проводилось по данным реконструкции климата лесной зоны Западной Сибири на основе спорово-пыльцевого анализа [31–33] и средних температур летних сезонов юга п-ва Ямал [17]. Палеоклиматические кривые [31–33] были оцифрованы и полученные радиоуглеродные возрасты их экстремумов – прокалиброваны. Эти кривые имеют недостаточно высокое разрешение и противоречивые данные для некоторых периодов. Поэтому для уточнения характеристик палеоклимата, определения климатической обусловленности, а также зональных особенностей стратиграфии и динамики изученного хасырея проведено сравнение полученных трендов водных режимов и видов палеогеокриологических процессов в конкретные временные периоды верхнего голоцена с аналогичными данными для болот лесной зоны Западной Сибири [21, 34–37] и криолитозоны Голарктики [38–53].

Результаты исследования и обсуждение

Стратиграфия

Торфяная залежь имеет глубину 80 см, сложена переходными топяными торфами и состоит из многочисленных тонких прослоек торфа, резко различающихся по ботаническому составу и общетехническим свойствам (R – 5...35 %, A – 6,2...43,1 %, P_{OB} – 25...240 г/дм³).

При этом четко выделяется три слоя, резко различающихся по свойствам. Верхний слой (0...26,5 см) образован сфагновыми торфами с низкими показателями степени разложения (R_{cp} – 6 %), зольности (A_{cp} – 10,2 %) и плотности OB (P_{cp} – 65 г/дм³). Средний слой (26,5...50,5 см) сложен травяными, травяно- и кустарничково-моховыми торфами, более разложившимися (R_{cp} – 16 %), высокозольными (A_{cp} – 27,6 %) и плотными (P_{cp} – 215 г/дм³). Нижний слой (50,5...80 см) состоит из гипновых и травяно-гипновых торфов с более низкими показателями степени разложения (R_{cp} – 13 %), зольности (A_{cp} – 12,1 %) и плотности (P_{cp} – 111 г/дм³). Для среднего слоя характерны наиболее частые резкие смены ботанического состава и свойств торфа. Торф с глубины 0,7 м мерзлый со льдом-цементом и гнездами льда (рис. 2).

Под торфом залегают песчаные суглинки с ржавыми пятнами и линзой бурого торфа, супесь серая с сизыми, черными пятнами и растительными остатками, параллельными волнистой слоистости, и пески пылеватые. Массивная криотекстура

торфа и суглинков внизу сменяется редкими тонкими косыми ломаными шпирями льда.

Хронология торфонакопления

Хронология торфонакопления основана на 6 калиброванных радиоуглеродных датах. Для подтверждения расчетного возраста (–51 кал. л. н. или 2001 г.) последней стадии развития хасырея проведено сравнение космоснимков Landsat [Google Earth <http://www.google.com/earth/explore>; даты обращения 03.2012 и 09.2014] за разные годы (рис. 3). Было выявлено, что последняя стадия высокого уровня вод в хасырее закончилась между 2003 и 2008 гг.

Реконструкция стадий-смен фитоценозов, водных режимов и геокриологических условий

Основными торфообразователями являлись суб- и гидрофитные осоки (*Carex rotundata*, *C. rariflora*), пушица (*Eriophorum scheichzeri*), аэро- и субгидрофитные мхи: *Warnstorfia fluitans*, *Sphagnum squarrosum* и *S. majus*. Изменение водного режима приводило в основном лишь к изменению соотношения обилия этих трав и мхов, а также появлению растений-мезофитов. В результате реконструкции функционального состояния хасырея было выявлено 7 крупных этапов его развития и 15 стадий-смен с 6 подстадиями. Стадии и подстадии имеют в основном внутривековой (13–77 лет), реже вековой (93–140 лет) масштабы.

Этап I, 80...72 см, 1294...1099 кал. л. н. – сильно обводненные моховые сообщества сплавин в условиях сезонного промерзания. Нижезалегающие осадки озера, вероятнее всего, находились не в промерзшем состоянии. Этап закончился переполнением озера и сбросом вод.

1-я стадия, с 1294 кал. л. н. – зарастание озера моховым сообществом из субгидрофитов *Sphagnum squarrosum* и *Calliergon stramineum* с примесью *S. majus*, *S. balticum* и наличием в травяном ярусе *Carex rotundata*, *Eriophorum scheichzeri*.

2-я стадия, с 1192 кал. л. н. – максимально обводненное гипновое сообщество с доминированием аэрогидрофита *Warnstorfia fluitans*, отложившее торфа минимальной R . В конце стадии увеличивается обилие осоки *Carex rariflora* под влиянием начавшегося сброса вод озера.

II этап, 3-я стадия, 72,0...62,5 см, 1099...984 кал. л. н. – средне обводненное осоково-пушицево-гипновое сообщество. Обилие остатков осоки (*Carex rariflora*), пушицы, появление менее гидрофильных мхов *Meesia triquetra* и *Oncophorus walhenbergii*, повышение R свидетельствуют о значительном понижении уровня болотных вод (УБВ) и уровня озера (УО). Наиболее сильное обсыхание поверхности происходило в начале и конце стадии (подстадии 3а, 3в), около 1099 (индицируется резким повышением R , A и наличием *Oncophorus walhenbergii*) и 1008 кал. л. н. (следами пожара и наличием ерника). Появлению *O. walhenbergii* и

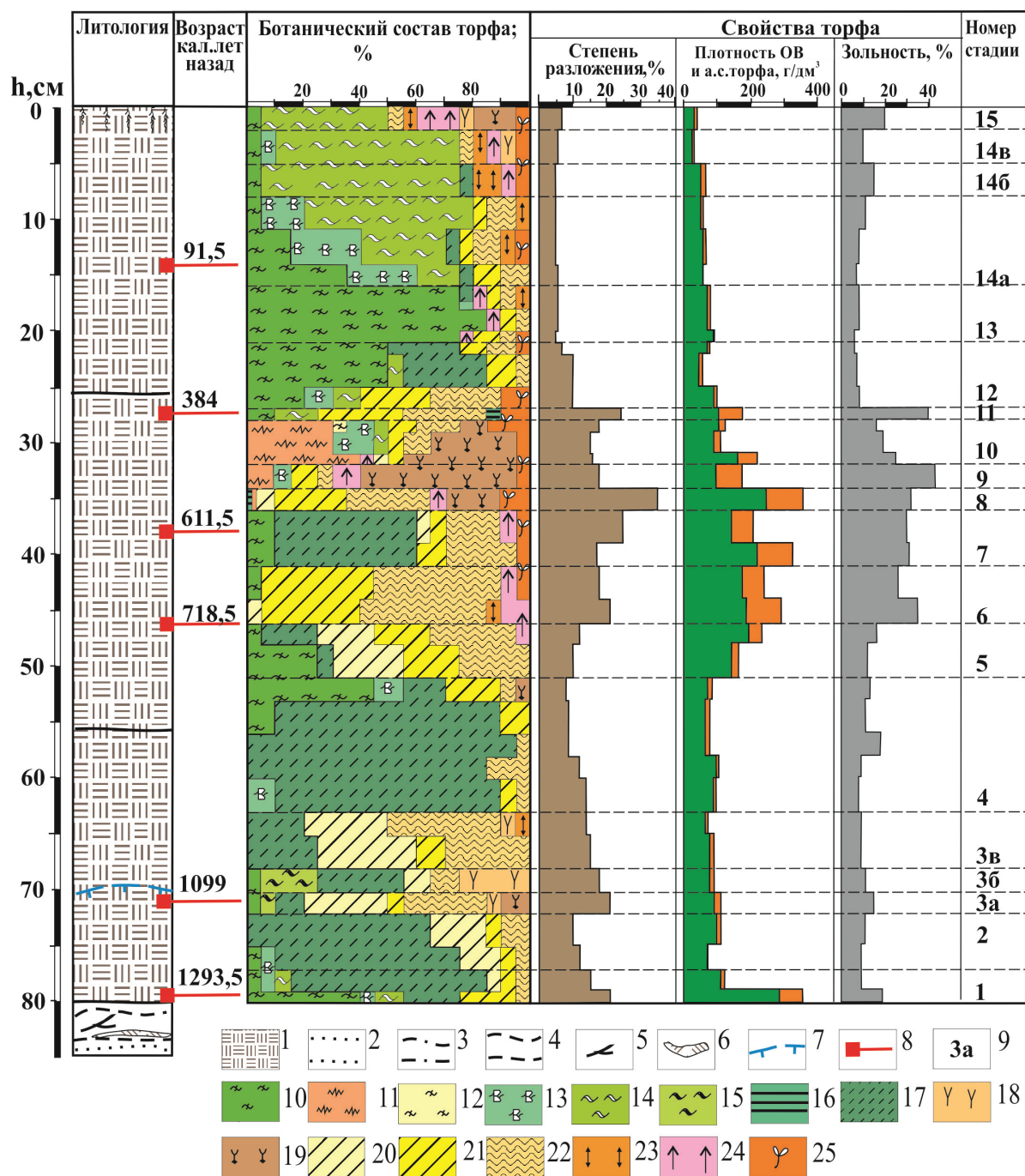


Рис. 2. Литология, ботанический состав и свойства торфа разреза Хасырей. Условные обозначения: 1) торф; 2) пески; 3) супе-
 си слоистые; 4) суглинки слоистые; 5) линзы торфа из мхов; 6) намытые растительные остатки; 7) верхняя граница мер-
 злого торфа (28.08.2014); 8) места отбора проб на радиоуглеродное датирование; 9) границы стадий формирования
 хасырея; растительные остатки в торфе: 10) *Sphagnum squarrosum*, 11) *S. lenense*, 12) *S. angustifolium*, 13) *S. balticum*,
 14) *S. majus*, 15) *S. platyphyllum*, 16) *S. riparium*, 17) *Warnstorfia fluitans*, *Drepanocladus* sp., *Calliergon* sp., 18) *Aulacomnium*
palustre, *Meesia triquetra*, 19) *Polytrichum juniperinum*, *Dicranum angustum*, *Oncophorus walenbergii*, 20) *Carex rariflora*,
 21) *C. rotundata*, 22) *Eriophorum* sp., 23) *Betula nana*, 24) *Ericaceae*, 25) *Rubus chamaemorus*

Fig. 2. Lithology, composition of macrofossil plant remains and peat features in section of the Khasyrey. Legend: 1) peat; 2) sands;
 3) laminated sandy loam; 4) laminated loam; 5) lenses of peat moss; 6) plant remains introduced with water; 7) upper bound-
 ary of frozen peat (28.08.2014); 8) locations of radiocarbon dating sampling; 9) borders of khasyrey formation stages; plant
 remains: 10) *Sphagnum squarrosum*, 11) *S. lenense*, 12) *S. angustifolium*, 13) *S. balticum*, 14) *S. majus*, 15) *S. platyphyllum*,
 16) *S. riparium*, 17) *Warnstorfia fluitans*, *Drepanocladus* sp., *Calliergon* sp., 18) *Aulacomnium palustre*, *Meesia triquetra*,
 19) *Polytrichum juniperinum*, *Dicranum angustum*, *Oncophorus walenbergii*, 20) *Carex rariflora*, 21) *C. rotundata*,
 22) *Eriophorum* sp., 23) *Betula nana*, 24) *Ericaceae*, 25) *Rubus chamaemorus*

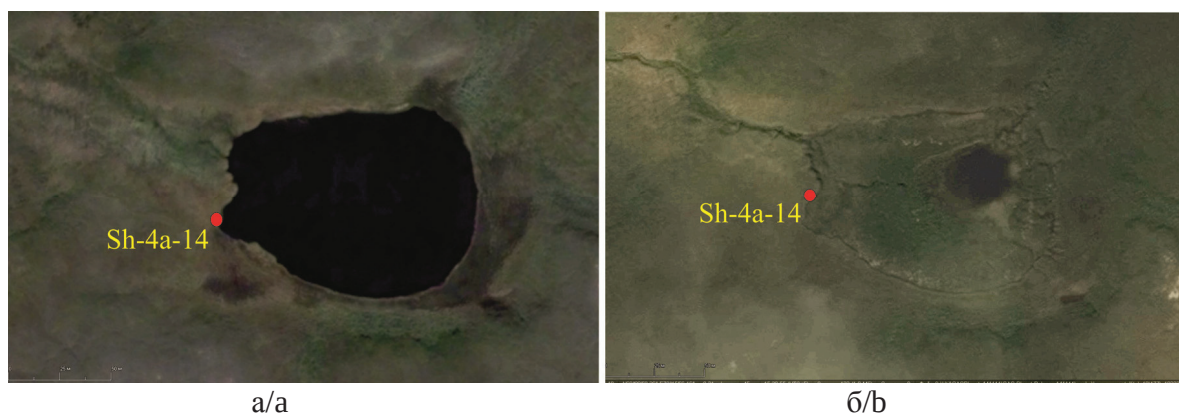


Рис. 3. Изменение площади озера изученного хасырея на космоснимках Landsat: а) 2003; б) 2008 г.

Fig. 3. Change in lake area of studied khasyreya on Landsat images: a) 2003; b) 2008

пожара способствовал переход поверхности хасырея в хорошо дренированные условия, вероятнее всего, при формировании низких (до 0,4 м) ММБ пучения. В середине стадии, 1065...1037 кал. л. н., сформировалось более обводненное моховое сообщество с *Warnstorfia fluitans*, *Sphagnum platyphyllum* и *Meesia triquetra*.

III этап, 4-я стадия, 63,0...50,5 см, 984...843 кал. л. н. – сильно обводненная гипсовая сплавина с *Warnstorfia fluitans*, с разреженным травяным ярусом из *Carex rotundata*, *Eriophorum scheichzeri*, значительное повышение УБВ и УО. В конце стадии (с 53 см, 869 кал. л. н.) – осоково-моховое сообщество со *Sphagnum squarrosum*, некоторое понижение УБВ в связи со спуском озера из-за его переполнения.

IV этап, 50,5...31,5 см, 843...434 кал. л. н. – прогрессирующее осушение. Этап разделяется на 5 стадий.

5-я стадия, с 50,5 см, с 843 кал. л. н. – средне обводненное осоково-пушицево-моховое сообщество, продолжающееся понижение УБВ.

6-я стадия, с 45,5 см, с 719 кал. л. н. – слабо обводненное осоково-пушицевое сообщество с *Carex rotundata*, значительное понижение УБВ. Исчезновение мхов, появление ерника, вересковых кустарничков, морошки, резкое возрастание *R*, *P* и *A* торфа. Вполне вероятно промерзание и кратковременное пучение низкого (0,4 м) ММБ.

7-я стадия, с 41 см, с 652 кал. л. н. – более обводненное осоково-пушицево-моховое сообщество с хорошо развитым моховым покровом из аэро- и субгидрофитов: *Drepanocladus aduncus*, *Warnstorfia fluitans*, *Brachitecium mildianum*, *Calliergon cardifolium* и *Sphagnum squarrosum*.

8-я стадия, с 35,5 см, 542 кал. л. н. – хорошо дренированное осоково-пушицевое сообщество с ерником, морошкой и *Polytrichum juniperinum*. Резкая смена на более мезофитное сообщество, максимальные значения *R*, *P* и *A* торфа свидетельствуют о значительном обсыхании поверхности. Слой торфа приобрел теплоизоляционные свойства, до-

статочные для перехода сезонно-талого слоя в ММ состояние. Началось площадное пучение болота. При этом пучению способствовало высокое обводнение предшествующей стадии, на которой создавался необходимый запас свободной влаги.

9-я стадия, с 33,5 см, 465 кал. л. н. – максимально дренированное сообщество с ерником, морошкой, моховым покровом из мезофитов: *Polytrichum juniperinum* и *Dicranum angustum*. О ММ состоянии и значительном дренировании торфяных отложений косвенно свидетельствуют и изменения их свойств. Сочетание нарушенной структуры (измельченность, потеря волокнистости) с низкой *R* и *P* торфа возникает в результате совместного воздействия многократного промерзания/оттаивания, ветровой и водной эрозии, снижения микробиологической активности деструкторов торфа в низкотемпературных условиях. Высокая зольность торфа и диффузное распределение минеральной компоненты в слое указывают на активный привнос эолового песка летом преимущественно с развеваемых соседних суходолов и, в меньшей степени, делювиальным стоком весенних талых вод. Происходило морозобойное растрескивание и формирование полигонального болота.

Этап V, 31,5...26,5 см, 434...330 кал. л. н. – деградация ММ, увеличение площади озера, а затем частичное его зарастание.

10-я стадия, с 31,5 см, 434 кал. л. н. – более обводненное моховое сообщество с морошкой, пушицей, осокой (*Carex rotundata*) и напочвенным покровом из *Sphagnum lenense* с примесью мезофитных и гидрофитных видов мхов, сформировавшееся при деградации ММ. Сначала содоминантом *Sphagnum lenense* являлся *Polytrichum juniperinum*. Затем появились *S. balticum*, *S. majus*, *S. riparium*, повысилось обилие пушицы и осоки. Данные сукцессии и понижение *R*, *P* и *A* торфа свидетельствуют о направленном повышении увлажнения поверхности хасырея. Увеличение глубины сезонного протаивания торфяных отложений привело сначала лишь к уменьшению высоты полигонов, а

затем они были затоплены водами озера. Резкое исчезновение *S. lenense* и высокое обилие диатомовых водорослей в торфе на глубине 28,5 см подтверждают это. Вероятнее всего, в конце этой стадии началось и наполнение озера хасырея за счет вод деградирующей мерзлоты окружающих суходолов.

11-я стадия, с 28 см, 384 кал. л. н. – менее обводненное осоково-пушицевое сообщество с морошкой и небольшим участием топяных гипновых мхов, сформировавшееся при зарастании периферии озера в связи с понижением уровня его вод. Высокая А (40,8 %) торфа, вероятнее всего, обусловлена привносом минеральной компоненты, активно поступающей с делювиальными водами из деградирующей ММ окружающих суходолов, а также осевшей на дне озера в предшествующий период. Повышение R торфа свидетельствует о еще нестабильном состоянии уровня вод озера хасырея.

Этап VI, 26,5...1,5 см, с 330 кал. л. н. – обводнение котловины, функционирование озера, образование сильно обводненных сплавин: моховой, а затем сфагновой. На этом этапе произошло оттаивание ММ торфа до глубины 0,5 м от палеоповерхности хасырея, частичное вытаивание сверху ледяных жил и образование выпуклых остаточных полигонов в результате термокарста и эрозии, локальное снижение верхней границы ММ пород. Торфонакопление происходило в талом состоянии, в условиях сезонного промерзания и относительно стабильно высоких уровней болотных вод, о чем свидетельствуют аэро- и субгидрофильный состав видов-торфообразователей, низкая P и R торфа.

12-я стадия, с 26,5 см, 330 кал. л. н. – сильно обводненные сообщества осоково-пушицево-сфагновой и моховой сплавин со *Sphagnum squarrosum* и *Warnstorfia fluitans*. Повышению обводненности в начале стадии, вероятно, способствовал также процесс деградации ММ окружающих суходолов.

13-я стадия, с 21,5 см, 224 кал. л. н. – сильно обводненное сфагновое сообщество со *S. squarrosum*.

14-я стадия, с 16 см, 91 кал. л. н. – сильно обводненное пушицево-сфагновое сообщество сплавины с доминированием олиготрофного *Sphagnum majus*. В соответствии с некоторыми различиями ботанического состава, Р, А, СУ и IW, свидетельствующими о колебаниях УБВ и УО, выявлено 3 подстадии, в том числе понижение УБВ с –5 кал. л. н. (1955 г.). Повышение зольности торфа обусловлено усилением эолового привноса песка, а также возрастанием запыленности атмосферы в XX веке.

Этап VII, 1-я стадия, 1,5...0 см, с –51 кал. л. н. – слабо обводненное ерниково-кустарничково-моховое сообщество со *S. majus* и примесью мезофитных и гидромезофитных гипновых мхов *Polytrichum juniperinum*, *Dicranum angustum*, *Oncophorus wahlenbergii*, *Aulacomnium palustre*. Начало обсыхания поверхности хасырея из-за сброса вод озера произошло, судя по данным космоснимков (рис. 3), между 2003 и 2008 гг. н. э.

Влияние климатических и локальных условий на динамику хасырея

В рассматриваемый период верхнего голоцена динамика гидрологического режима и геокриологических условий хасырея в основном, за исключением некоторых временных периодов, хорошо согласуется с данными реконструкций регионального климата лесной зоны (рис. 4).

Синхронизация с палеоклиматическими кривыми средней температуры лета для Ямала (рис. 5) позволила выявить влияние изменения степени континентальности климата на динамику хасырея.

Зарастание озера сплавной началось около 1294 кал. л. н. в условиях конца сухого похолодания [31, 33] и прохладных летних сезонов [17]. Повышение обводненности около 1192 кал. л. н., а затем сброс вод в результате переполнения озера и термоэрозии его берега были обусловлены внутривековым влажным потеплением с теплыми летними сезонами [17, 32]. Повышение обводненности 1220...1157 кал. л. н. выявлено и на южнотаежном болоте [37].

Обсыхание поверхности хасырея 1099...984 кал. л. н., сначала из-за сброса вод, усилилось влиянием аридизации климата [32], а его похолодание [17, 31–33] обусловило многолетнее промерзание и пучение торфяных отложений. Повышение обводненности 1065...1037 кал. л. н. свидетельствует о наличии кратковременного влажного периода, вероятнее всего теплого. Аналогичный отклик имеют болота лесной зоны: обсыхание поверхности и формирование ММБ пучения 1123...1010 кал. л. н. [34, 36]. Сходный возраст имеет начало сухого периода, реконструированного в торфяном разрезе Мухрино среднетаежного болота [54]. Однако неправомерная длительность этой стадии 1170...80 кал. л. н., по нашему мнению, обусловлена переходом на стадию выпуклого верхового болота, то есть аутогенным ходом развития, а не изменением климата.

Повышение обводненности 984...843 кал. л. н. вызвано влажным потеплением климата [31, 33] и максимально теплыми летними сезонами. На болотах лесной зоны начало этого влажного периода датировано 997...860 кал. л. н. [21, 34, 36]. Эта стадия соответствует Средневековому теплему периоду (СТП), проявившемуся по-разному в разных регионах, в том числе в соседних: ~ 1050...650 кал. л. н. на Полярном Урале [55], с кульминацией около 950 кал. л. н. на Среднем Урале [56], 1100...800 кал. л. н. на Восточном Таймыре и Путоране [57], с 1150 кал. л. н. на болотах Северной Польши [58] и Румынии [59]. Более поздний отклик болот Западной Сибири на условия СТП, по нашему мнению, обусловлен проявлением на них криогенных процессов в предшествующее похолодание.

Прогрессирующее осушение с 843...434 кал. л. н. из-за сброса вод озера усилилось криогенными процессами в торфяных и подстилающих мине-

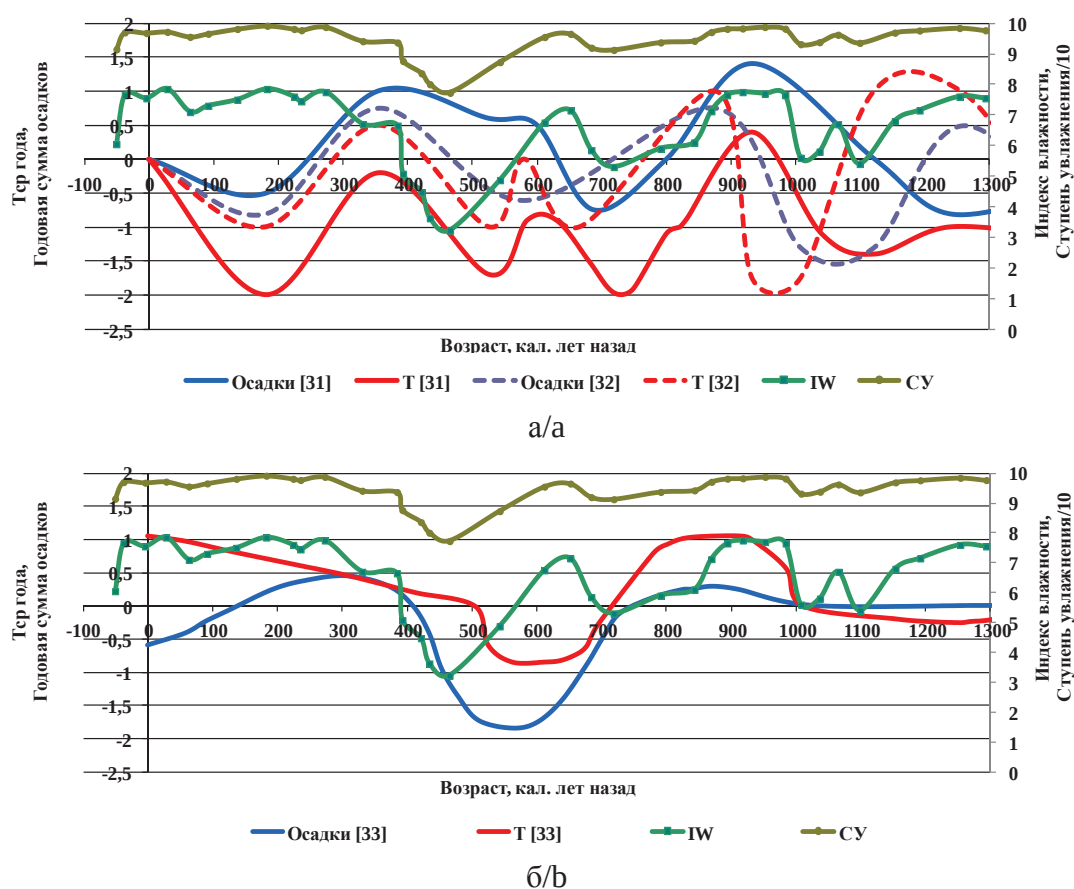


Рис. 4. Динамика палеогидрологического режима торфяного разреза Хасырей и палеоклиматические кривые отклонений от современных показателей средней температуры года и годовой суммы осадков для лесной зоны Западной Сибири: а) по [31, 32], б) 2 [33]. *Среднегодовая температура воздуха [33] и годовое количество осадков [31–33] приведены в относительных величинах

Fig. 4. Dynamics of paleohydrological regime of the Khasyrey peat section and paleoclimatic curves of average annual temperature and annual precipitation for the forest zone of Western Siberia: a) [31, 32], b) 2 [33]. *Annual average temperature [33] and annual precipitation [31–33] are shown in relative terms

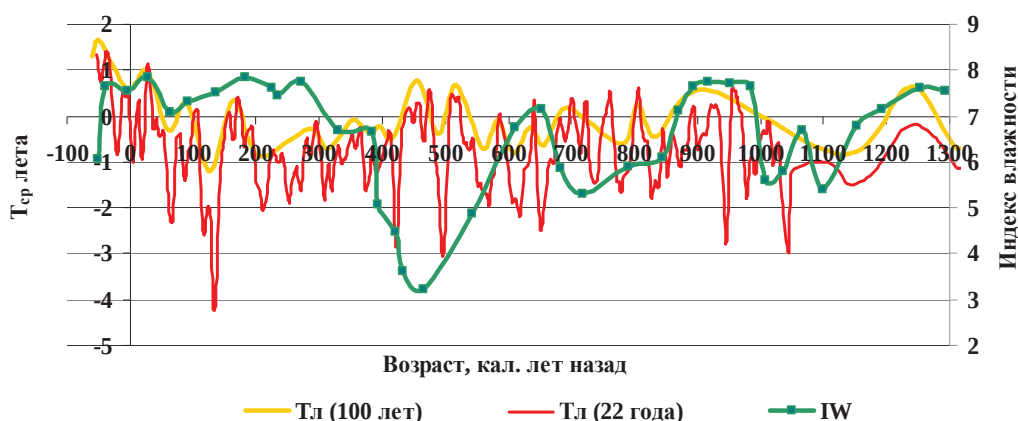


Рис. 5. Динамика палеогидрологического режима торфяного разреза Хасырей и палеоклиматические кривые отклонений от современных показателей средней температуры лета для Ямала, сглаженной окнами 100 и 22 года [17]

Fig. 5. Dynamics of paleohydrological regime of the Khasyrey peat section and paleoclimatic curves of average summer temperature deviation from current indices for southern Yamal, smoothed by the windows of 100 and 22 [17]

ральных отложениях в условиях одного из самых холодных субпериодов Малого ледникового периода (МЛП), по [60], который для лесной зоны Западной Сибири реконструирован как сухое похолодание [32, 33]. Начало обсыхания поверхности с 843 кал. л. н. происходило, вероятнее всего, под совместным влиянием сброса вод озера и направленного изменения климата от все еще теплого и влажного [32, 33] к холодному и сухому [31]. Более значительному обсыханию и пучению низкого ММБ около 719 кал. л. н. способствовал экстремум сухого похолодания [31–33]. Возрастание обводненности 652...542 кал. л. н. вызвано кратковременным влажным потеплением [31] при значительном варьировании летних температур. Аналогичное повышение обводненности 559 кал. л. н. выявлено на среднетаежном болоте [21]. Площадному пучению поверхности хасырея с 542 кал. л. н. в условиях направленного похолодания и аридизации климата способствовало высокое обводнение предшествующей стадии, на которой создался необходимый запас свободной влаги. А морозобойное растрескивание и формирование полигонального болота с 465 кал. л. н. было обусловлено влиянием экстремума похолодания, принятого за начало МЛП (470 кал. л. н.) в Арктике (от Полярного Урала до п-ва Таймыр), по данным исследования озерных осадков [61]. Проявлению палеокриогенных процессов 542...434 кал. л. н. благоприятствовало возрастание континентальности климата. При этом максимально высокие летние температуры [17] обеспечивали наличие свободной влаги как для пучения, так и для роста ледяных жил, за счет более глубокого сезонного протаивания. Стадии формирования полигонального болота близки по возрасту периоду сухого похолодания в лесной зоне Западной Сибири, максимум которого реконструирован около 525 [31, 32] или 575 кал. л. н. [33], и периоду активного пучения высоких ММБ – 615...465 кал. л. н. на болотах средней [21], южной тайги и подтайги [34–37].

Деградация ММ 434...330 кал. л. н. была вызвана уменьшением континентальности климата, судя по понижению летних температур [17], затем – влажным потеплением [31–33]. На болотах лесной зоны начало повышения обводненности и зарастания термокарстовых озер на месте деградировавших крупных ММБ датировано 380...304 кал. л. н. [36, 37]. Высокая обводненность хасырея 330...91 кал. л. н. обусловлена тем, что в МЛП произошла климатическая инверсия и периоды похолоданий стали влажными [62]. Влажное похолодание 465...300 кал. л. н. реконструировано и на полигональных болотах арктических тундр Канады [63]. Начиная с этого периода, синхронизация с палеоклиматическими кривыми лесной зоны [31–33] невозможна из-за их низкого разрешения. Олиготрофизация растительности хасырея около 91 кал. л. н., вероятнее всего, обусловлена возрастом доли атмосферных осадков в его питании

из-за уменьшения толщины сезонно-талого слоя торфа в один из экстремумов МЛП в конце предшествующей стадии, а высокая обводненность – с направленным потеплением после МЛП. Кратковременное понижение обводненности –5 кал. л. н. (1955 г.) вызвано известным внутривековым понижением температуры и атмосферных осадков. Сброс вод озера, вызвавший обсыхание поверхности на современной стадии обусловлен его переполнением и термоэрозией берега под влиянием глобального потепления, активизировавшего дегградацию ММ пород.

О климатической обусловленности выявленных палеогеокриологических процессов в тундре Ямала свидетельствует и синхронность их с аналогичными процессами в торфяных отложениях болот криолитозоны других северных регионов Голарктики. Синхронны периоды пучения низких ММБ на хасырее – 1099...984 кал. л. н. и высоких ММБ на субарктических торфяниках Квебека – 1100...1071 кал. л. н. [38, 39], Скандинавии – 1057...967 кал. л. н. [40, 41], севера европейской части России – 1052...981 [7]. Синхронны и периоды наиболее активного проявления криогенных процессов в хасырее – 719...330 кал. л. н., и активного пучения на болотах субарктической Канады (Квибек) – 740...295 [38, 39, 42–47], северной Скандинавии и Финляндии – 652...391 [48–52], возникновения некоторых ММБ севера европейской части России – 598...465 кал. л. н. [53]. Для бугров пучения криолитозоны Западной Сибири радиоуглеродные даты данного периода практически отсутствуют, что обусловлено исследованием преимущественно крупных бугров более древних болот. В северной тайге сходный возраст, около 540 кал. л. н., на глубине 40 см имеет один ММБ [7], а возраст поверхностного слоя торфа, около 94 кал. л. н., второго ММБ [64] близок к возрасту олиготрофизации растительности исследуемого хасырея.

Выводы

На основании детальной реконструкции динамики растительных сообществ, водного режима и геокриологических условий верхнеголоценового хасырея Центрального Ямала выявлено:

- исследованный хасырей обладает чутким откликом, внутривекового и векового масштабов, на климатические изменения верхнего голоцена, что обосновывает возможность использования торфяных отложений хасыреев криолитозоны Западной Сибири как базовых объектов для разработки высокоразрешающих реконструкций и краткосрочных прогнозов природно-климатических изменений на ближайшие столетия;
- для 1300-летнего периода формирования хасырея выявлено 7 крупных этапов, 15 стадий с 6-ю подстадиями изменения его функционального состояния: палеофитоценозов, водных режимов и геокриологических условий;

- палеозокотопы были наиболее влажными 952...843 кал. л. н. и 273 кал. л. н....2001 г. в периоды влажных потеплений и похолоданий, максимально дренированными 1099...1065 и 1037...984, 719...652, 542...434 кал. л. н. в периоды сухих похолоданий. Обсыхание поверхности хасырея происходило также между 1192 и 1099, 869 и 843 кал. л. н., 2003 и 2008 гг., в периоды влажных потеплений из-за сброса вод озера;
- высока вероятность кратковременного формирования низких ММБ пучения в периоды сухих похолоданий: 1099...1065, 1008...984 и 719...652 кал. л. н. Формирование полигонального торфяника происходило в сухой субпериод Малого ледникового периода 542...434 кал. л. н. Во влажный теплый субпериод около 434 кал. л. н. началась деградация ММ, а с 330 кал. л. н. – частичное вытаивание ледяных жил с образованием торфяника с выпуклыми остаточными полигонами;
- оптимальные условия для формирования бугров пучения и полигонально-жилых льдов в хасыреях тундровой зоны создавались при воз-

растании континентальности климата и летних температур в периоды сухих похолоданий;

- хорошая согласованность динамик водных режимов и геокриологических условий исследуемого хасырея, болот лесной зоны Западной Сибири и криолитозон других регионов, а также с данными реконструкций регионального климата свидетельствует о климатической обусловленности пульсирующего характера развития хасыреев тундры Западной Сибири;
- климат влиял непосредственно – через гидро-термический режим, и косвенно – через криогенные процессы в торфяных отложениях и уровень режим озера;
- в верхнем голоцене торфяные отложения хасыреев тундры неоднократно подвергались воздействию криогенных процессов, что обусловило повышение степени разложения и плотности торфов, а активный эоловый привнос в периоды сухих похолоданий привел к их высокой зольности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 14-17-00131.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Christensen T.R. Climate science: Understand Arctic methane variability // *Nature*. – 2014. – № 509. – P. 279–281.
2. Climate change and the permafrost carbon feedback / V.E. Romanovsky, K. Schaefer, M.R. Turetsky, C.C. Treat, J.E. Vonk // *Nature*. – 2015. – № 520. – P. 171–179.
3. Long-term successional changes in peatlands of the Hudson Bay Lowlands, Canada inferred from the ecological dynamics of multiple proxies / K.E. Hargan, K.M. Rühland, A.M. Paterson, J. Holmquist, G.M. MacDonald, J. Bunbury, S.A. Finkelstein, J.P. Smol // *The Holocene*. – 2015. – № 25. – P. 92–107.
4. Self A.E., Jones V.J., Brooks S.J. Late Holocene environmental change in arctic western Siberia // *The Holocene*. – 2015. – № 25. – P. 150–165.
5. Roy N., Woollett J., Bhiri N. Paleoeological perspectives on landscape history and anthropogenic impacts at Uivak Point, Labrador, since AD 1400 // *The Holocene*. – 2015. – № 25. – P. 1742–1755.
6. The 5.2 ka climate event: evidence from stable isotope and multiproxy palaeoecological peatland records in Ireland / T.P. Roland, T.J. Daley, C.J. Caseldine, D.J. Charman, C.S.M. Turney, M.J. Amesbury, G.J. Thompson, E.J. Woodley // *Quaternary Science Reviews*. – 2015. – № 124. – P. 209–223.
7. Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов / Ю.К. Васильчук, А.К. Васильчук, Н.А. Буданцева, Ю.Н. Чижова; под ред. Ю.К. Васильчука. – М.: Из-во Московского ун-та, 2008. – 571 с.
8. Буданцева Н.А. Формирование повторно-жилых льдов и бугров пучения в голоцене: на примере Большеземельской тундры и севера Западной Сибири: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – М.: Изд-во МГУ, 2003. – 32 с.
9. Oxygen stable isotope variation in late Holocene ice wedges in Yamal peninsula and Svalbard / Y.K. Vasilchuk, N.A. Budantseva, H.H. Christiansen, Ju.N. Chizhova, A.C. Vasilchuk, A.M. Zemskova // *Geography, environment, sustainability*. – 2015. – № 8 (3). – P. 36–54.
10. West Siberian peatlands: distribution, typology, hydrology, cyclic development, present-day climate-driven changes and impact on CO₂ cycle / S. Kirpotin, Y. Polishchuk, N. Bryksina, A. Sugaipova, A. Kouraev, E. Zakharova, O.S. Pokrovsky, L.S. Shirokova, M. Kolmakova, R. Manassypov, B. Dupre // *International Journal of Environmental Studies*. – 2011. – № 68. – P. 603–623.
11. Тыртыков А.П. Влияние растительного покрова на промерзание и протаивание грунтов. – М.: Изд-во Московского ун-та, 1969. – 192 с.
12. Mid-Wisconsin to Holocene permafrost and landscape dynamics based on a drained lake basin core from the northern Seward Peninsula, northwest Alaska / J. Lenz, G. Grosse, B.M. Jones, K.M. Walter Anthony, A. Bobrov, S. Wulf, S. Wetterich // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2016. – № 27. – Iss. 1. – P. 56–75.
13. Methane emissions from permafrost thaw lakes limited by lake drainage / J. Van Huissteden, C. Berrittella, F.J.W. Parmentier, Y. Mi, T.C. Maximov, A.J. Dolman // *Nature Climate Change*. – 2011. – № 1. – P. 119–123.
14. Vardy S.R., Warner B.G., Aravena R. Holocene climate and the development of a subarctic peatland near Inuvik, Northwest Territories, Canada // *Climate Change*. – 1998. – № 40. – P. 285–313.
15. River flooding as a driver of polygon dynamics: modern vegetation data and a millennial peat record from the Anabar River lowlands (Arctic Siberia) / R. Zibulski, U. Herzschuh, L.A. Pestryakova, J. Wolter, S. Müller, N. Schilling, S. Wetterich, L. Schirmermeister, F. Tian // *Biogeosciences*. – 2013. – № 10. – P. 5703–5728.
16. Jones B.M., Arp C.D. Observing a catastrophic thermokarst lake drainage in northern Alaska // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2015. – № 26. – P. 119–128.
17. Reassessing the evidence for tree-growth and inferred temperature change during the Common Era in Yamalia, northwest Siberia / K.R. Briffa, T.M. Melvin, T.J. Osborn, R.M. Hantemirov, A.V. Kirdyanov, V.S. Mazepa, S.G. Shiyatov, J. Esper // *Quaternary Science Reviews*. – 2013. – № 72. – P. 83–107.
18. Геокриология СССР. Западная Сибирь / под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Недра, 1989. – 454 с.
19. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. URL: <http://mete.ru> (дата обращения: 03.12.2015).

20. Слагода Е.А., Ермак А.А. Дешифрирование экзогенных процессов типичных тундр полуострова Ямал на примере территории района среднего течения р. Юрибей // Вестник Тюменского государственного университета. Науки о Земле. – 2014. – № 4. – С. 28–38.
21. Прейс Ю.И. Детальная реконструкция функционального состояния болота как отклик на изменения континентального климата голоцена (средняя тайга Западной Сибири) // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 2. – С. 90–102.
22. IntCal13 and MARINE13 radiocarbon age calibration curves 0–50000 years cal BP / P.J. Reimer, E. Bard, A. Bayliss, J.W. Beck, P.G. Blackwell, C. Bronk Ramsey, C.E. Buck, H. Cheng, R.L. Edwards, M. Friedrich, P.M. Grootes, T.P. Guilderson, H. Hafflidason, I. Hajdas, C. Hatté, T.J. Heaton, A.G. Hogg, K.A. Hughen, K.F. Kaiser, B. Kromer, S.W. Manning, M. Niu, R.W. Reimer, D.A. Richards, E.M. Scott, J.R. Southon, C.S.M. Turney, J. van der Plicht // Radiocarbon. – 2013. – № 55 (4). – P. 1869–1887.
23. Stuiver M., Reimer P.J., Reimer R.W. CALIB 7.0.4 Manual. – 2013. URL: <http://calib.qub.ac.uk/calib/download/> (дата обращения: 21.10.2015).
24. Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову / Л.Г. Раменский, И.И. Цаценкин, О.Н. Чижилов, Н.А. Антипин. – М.: Сельхозгиз, 1956. – 472 с.
25. Бабешина Л.Г., Зверев А.А. Оценка условий местообитаний сфагновых мхов Западно-Сибирской равнины: фактор увлажнения // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2010. – № 331. – С. 185–192.
26. Елина Г.А., Юрковская Т.К. Методы определения палеогидрологического режима как основа объективизации причин сукцессий растительности болот // Ботанический журнал. – 1992. – Т. 77. – № 7. – С. 120–124.
27. Лапшина Е.Д. Флора болот юго-востока Западной Сибири. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2003. – 296 с.
28. Экологическая оценка флоры и растительности Центральной Якутии / А.Ю. Королюк, Е.И. Троева, М.М. Черосов, В.И. Захарова, П.А. Гоголева, С.И. Миронова. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2005. – 108 с.
29. Effects of permafrost aggradation on peat properties as determined from a pan-Arctic synthesis of plant macrofossils / M.C. Jones, P. Camill, A. Gallego-Sala, M. Garneau, J.W. Harden, G. Hugelius, E.S. Klein, U. Kokfelt, P. Kuhry, J. Loisel, P.J.H. Mathijssen, J.A. O'Donnell, P.O. Oksanen, T.M. Ronkainen, A.B.K. Sannel, J. Talbot, C. Tarnocai, M. Valiranta // Biogeosciences. – 2016. – № 12 (1). – P. 78–94.
30. Мониторинг экзогенных геологических процессов на трассе газопровода Надым-Пунга / Н.Г. Москаленко, О.Е. Пономарева, Л.А. Казанцева, Е.В. Устинова // Инженерные изыскания. – 2007. – № 1. – С. 34–36.
31. Бляхарчук Т.А., Климанов В.А. Сукцессии болотной растительности и климат по данным исследования двух торфяников на юге Западной Сибири // Структура и развитие болотных экосистем и реконструкция палеогеографических условий: тезисы докладов X Всес. семинара-экскурсии. – Таллин: Изд-во АН Эстонии, 1989. – С. 45–49.
32. Blyakharchuk T.A. Western Siberia, a review of Holocene climatic changes // Journal of Siberian Federal University. Biology. – 2009. – № 2 (1). – P. 4–12.
33. Волкова В.С., Гнибиденко З.Н., Горячева А.А. Климатическая ритмика голоцена центральной части Западно-Сибирской равнины (палинология, магнетизм) // Основные закономерности глобальных и региональных изменений климата и природной среды в позднем кайнозое Сибири. – Новосибирск: Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2002. – С. 48–57.
34. Оценка потоков минерального вещества по свойствам торфяных отложений Бакчарского болота (южная тайга Западной Сибири) / Ю.И. Прейс, В.А. Бобров, В.В. Будашкина, В.М. Гавшин // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 1. – С. 43–47.
35. Прейс Ю.И., Курьина И.В. Реконструкция высокого разрешения палеозкотопов болот южной тайги Западной Сибири как отклик на изменения климата голоцена // Исследование природно-климатических процессов на территории Большого Васюганского болота / под ред. М.В. Кабанова. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. – С. 14–38.
36. Прейс Ю.И. Палеокриогенные процессы в торфяных отложениях юга лесной зоны Западной Сибири // Климатология и гляциология Сибири: материалы Междунар. науч.-практ. конференции / под ред. В.П. Горбатенко, В.В. Севастьянова. – Томск, 2012. – С. 226–227.
37. Прейс Ю.И. Динамика глядово-озерного комплекса Иксинского болота (Западная Сибирь) как отклик на изменения климата второй половины голоцена // География и природные ресурсы. – 2016. – № 2. – С. 94–103.
38. Asselin H., Payette S. Origin and long-term dynamics of a subarctic tree line // Ecoscience. – 2006. – № 13 (2). – P. 135–142.
39. Bhry N., Payette S., Robert E.C. Peatland development at the arctic tree line (Quebec, Canada) influenced by flooding and permafrost // Quaternary Research. – 2007. – № 67. – P. 426–437.
40. Åhman R. C14 dating an palsar i Nord-Norge // Svensk Geografisk Årsbok. – 1969. – № 45. – p. 155–158.
41. Vorren K.-D., Vorren B. The problem of dating a palsa: two attempts involving pollen diagrams, determination of moss subfossils, and ¹⁴C datings // Astarte. – 1975. – № 8. – P. 73–81.
42. Payette S., Delwaide A. Recent permafrost dynamics of subarctic wetlands forests over the past 1500 years // Ecological Monographs. – 2004. – № 74. – P. 373–391.
43. Arlen-Pouliot Y., Bhry N. Palaeoecology of a palsa and a filled thermokarst pond in a permafrost peatland, subarctic Quebec, Canada // The Holocene. – 2005. – № 15 (3). – P. 408–419.
44. Roberts B.A., Simon N.P.P., Deering K.W. The forests and woodlands of Labrador, Canada: ecology, distribution and future management // Ecological Research. – 2006. – № 21 (6). – P. 868–880.
45. Kuhry P. Palsa and peat plateau development in the Hudson Bay Lowlands, Canada: timing, pathways and causes // Boreas. – 2008. – № 37 (2). – P. 316–327.
46. Loisel J., Garneau M. Late Holocene paleoecohydrology and carbon accumulation estimates from two boreal peat bogs in eastern Canada: Potential and limits of multi-proxy archives // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2010. – № 291. – P. 493–533.
47. Van Bellen S., Garneau M., Booth R.K. Holocene carbon accumulation rates from three ombrotrophic peatlands in boreal Quebec, Canada: impact of climate-driven ecohydrological change // The Holocene. – 2011. – № 21. – P. 1217–1231.
48. Wetzel H., Fleige H., Horn R. Degradation of palsas in the region of Northern-Norway. – Germany: IPNSS, 2005. – 10 p.
49. Zuidhoff F.S., Kolstrup E. Changes in palsa distribution in relation to climate change in Laivadal, northern Sweden, especially 1960–1997 // Permafrost and Periglacial Processes. – 2000. – V. 11. – № 1. – P. 55–69.
50. Seppälä M. Palsa mires in Finland // The Finnish environment. – 2006. – № 23. – P. 155–162.
51. Vorren K.-D. Stratigraphical investigations of a palsa bog in northern Norway // Astarte. – 1972. – № 5 (1–2). – P. 39–71.
52. Vorren K.-D. Recent palsa datings, a brief survey // Norsk geografisk tidsskrift. – 1979. – № 33. – P. 217–219.
53. Oksanen P.O. Development of palsa mires on the Northern European continent in relation to Holocene climatic environmental changes: Academic Dis. – Oulu, 2005. – 50 p.

54. Hydrological dynamics and fire history of the last 1300 years in western Siberia reconstructed from a high-resolution, ombrotrophic peat archive / M. Lamentowicz, M. Słowiński, K. Marcisz, M. Zielińska, K. Kaliszan, E. Lapshina, A. Gilbert, A. Butler, B. Fiałkiewicz-Kozieł, V.E.J. Jassey, F. Laggoun-Defarge, P. Kołaczek // *Quaternary Research*. – 2015. – № 84 (3) – P. 312–325.
55. Shiyatov S.G. Rates of changes in the upper treeline ecotone in the Polar Ural Mountains // *PAGES News*. – 2003. – V. 11. – № 1. – P. 8–10.
56. Demezhko D.Yu., Shchapov V.A. 80,000 years ground surface temperature history inferred from the temperature-depth log measured in the superdeep hole SG-4 (the Urals, Russia) // *Global and Planetary Change*. – 2001. – № 29 (1–2). – P. 167–178.
57. Naurzbaev M.M., Vaganov E.A. Variation of early summer and annual temperature in east Taymir and Putoran (Siberia) over the last two millennia inferred from tree rings // *Journal of Geophysical Research*. – 2000. – № 105 (6). – P. 7317–7326.
58. Long-term hydrological dynamics and fire history during the last 2000 years in CE Europe reconstructed from a high-resolution peat archive / K. Marcisz, W. Tinner, D. Colombaroli, P. Kołaczek, M. Słowiński, B. Fiałkiewicz-Kozieł, E. Łokas, M. Lamentowicz // *Quaternary Science Reviews*. – 2015. – № 112. – P. 138–152.
59. Last Millennium hydro-climate variability in Central-Eastern Europe (Northern Carpathians, Romania) / A. Feurdean, M. Gałka, E. Kuske, I. Tanțău, M. Lamentowicz, G. Florescu, J. Liakka, S.M. Hutchinson, A. Mulch, T. Hickler // *The Holocene*. – 2015. – № 25 (7). – P. 1179–1192.
60. Structure and origin of Holocene cold events / H. Wanner, O. Solomina, M. Grosjean, S.P. Ritz, M. Jönlund // *Quaternary Science Reviews*. – 2011. – № 30. – P. 3109–3123.
61. Развитие природной среды полярных областей Земли последнего тысячелетия по данным изучения донных отложений озер / Д.Ю. Большианов, А.С. Макаров, Е.А. Морозова, М.В. Павлов, Л.М. Саватюгин // *Проблемы Арктики и Антарктики*. – 2009. – № 1 (81). – С. 108–115.
62. Хотинский Н.А. Голоцен Северной Евразии. – М.: Наука, 1977. – 198 с.
63. Ellis C.J., Rochefort L. Century-scale development of polygon-patterned tundra wetland, Bylot island (738 N, 808 W) // *Ecology*. – 2004. – № 85 (4). – P. 963–978.
64. Кирпотин С.Н., Бляхарчук Т.А., Воробьев С.Н. Динамика субарктических плоскобугристых болот Западно-Сибирской равнины как индикатор глобальных климатических изменений // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. – 2003. – № 7. – С. 122–134.

Поступила 07.08.2016 г.

Информация об авторах

Прейс Ю.И., кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геоинформационных технологий Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН.

Симонова Г.В., кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории биоинформационных технологий Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН.

Слагода Е.А., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории комплексных методов изучения криогенных геосистем Института криосферы Земли СО РАН; ведущий научный сотрудник кафедры криософии Тюменского государственного университета; старший научный сотрудник субарктического полигона Тюменского индустриального университета.

UDK 556.56: 551.345:551.583:56.074.6(571.1)

DETAILED STRATIGRAPHY AND DYNAMICS OF CENTRAL YAMAL KHASYREY DURING THE LATE HOLOCENE

Yulia I. Preis¹,
preisyui@rambler.ru

Galina V. Simonova¹,
preisyui@rambler.ru

Elena A. Slagoda^{2,3,4},
eslagoda@ikz.ru

¹ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10/3, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634021, Russia.

² Earth Cryosphere Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 86, Malygin street, Tyumen, 625026, Russia.

³ Tyumen State University, 6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russia.

⁴ Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

The relevance of the discussed issue is caused by insufficient knowledge of the stratigraphy and dynamics of peatland of the Western Siberia tundra zone and the impact of permafrost conditions and climate.

The main aim of the research is the detailed study of stratigraphic and reconstruction of the dynamics of plant communities, water regimes and geocryological conditions of Central Yamal khasyrey.

The methods used in the research: detailed (1...3,5 cm) study of the macrofossils composition and physic-chemical properties of peat, radiocarbon dating (6 dates) peat deposit; reconstruction of phytoceanozes and water regimes by traditional paleoecological methods, reconstruction of paleogeocryological conditions according to paleophytocoenoses successions and peat secondary diagenesis; comparative analysis of the obtained data with the data of reconstructions of regional climate and functional state of mires to other zones and regions.

The results. For the first time the authors have obtained the detailed stratigraphy of peat deposits, data on peat density and its organic substance. By the example of the khasyrey in the Lake Sokhonto area of Central Yamal the authors determined the impact of paleocryological conditions on increase of peat decomposition degree and density. They carried out the detailed reconstruction of khasyrey dynamics for the 1300-year period of its formation. Seven large stages and 15 stages with 6 substages of khasyrey formation of interdecadal and century scale were revealed. Water regimes and cryogenic conditions of these stages are in agreement with similar reconstructions data of mires of Western Siberia forest zone and Holarctic cryolithozone regional climate. The authors differentiated 2 periods in which khasyrey surface was wet: 952...843; 273 cal. yr. BP...2001 yr. The khasyrey surface was drained maximally during 4 periods: 1099...1065 and 1037...984; 719...652; 542...434 cal. yr. BP. The short-term formation of low permafrost mound during periods of 1099...1065; 1008...984 and 719...652 cal. yr. BP is of high probability. Formation of polygonal mire took place during 542...434 cal. yr. BP. Since 434 cal. yr. BP the depth of seasonal thawing increased, and since 330 cal. yr. BP the ice veins started melting, formation of mire with raised-centre polygons was caused by thermokarst and erosion. In 136...91 cal. yr. BP the depth of seasonal thawing decreased. Drainage of a khasyrey surface in a consequence of waters dumping of the khasyrey lake during the wet warm periods took place between 1153 and 1099, 869 and 843 cal. yr. BP; ca. 2003 and 2008 yrs. Thus, climate changes in the Western Siberia tundra were the main cause of pulsating nature of khasyreis in contrast to the more southern areas. Climate influence was direct, through the hydrothermal regime, and indirect, through cryogenic processes in peat deposit and the water table regime of the lake. Optimal conditions for palsa and polygonal mire formation were created with increasing continental climate and summer temperatures during periods of dry cooling.

Key words:

Peat deposit, reconstruction, plant communities, water regime, permafrost, climate, Holocene, tundra, Western Siberia.

The research was supported by the grant RSF no. 14–17–00131.

REFERENCES

1. Christensen T.R., Climate science: Understand Arctic methane variability. *Nature*, 2014, no. 509, pp. 279–281.
2. Romanovsky V.E., Schaefer K., Turetsky M.R., Treat C.C., Vonk J.E. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*, 2015, no. 520, pp. 171–179.
3. Hargan K.E., Rühland K.M., Paterson A.M., Holmquist J., MacDonald G.M., Bunbury J., Finkelstein S.A., Smol J.P. Long-term successional changes in peatlands of the Hudson Bay Lowlands, Canada inferred from the ecological dynamics of multiple proxies. *The Holocene*, 2015, no. 25, pp. 92–107.
4. Self A.E., Jones V.J., Brooks S.J. Late Holocene environmental change in arctic western Siberia. *The Holocene*, 2015, no. 25, pp. 150–165.
5. Roy N., Woollett J. and Bhiry N. Paleoeological perspectives on landscape history and anthropogenic impacts at Uivak Point, Labrador, since AD 1400. *The Holocene*, 2015, no. 25, pp. 1742–1755.
6. Roland T.P., Daley T.J., Caseldine C.J., Charman D.J., Turney C.S.M., Amesbury M.J., Thompson G.J., Woodley E.J. The

- 5.2 ka climate event: Evidence from stable isotope and multiproxy palaeoecological peatland records in Ireland. *Quaternary Science Reviews*, 2015, no. 124, pp. 209–223.
7. Vasilchuk Yu.K., Vasilchuk A.K., Budantseva N.A., Chizhova Yu.N. *Vypuklye bugry pucheniya mnogoletnemerzlykh torfyanikh massivov* [Palsa of frozen peat mires]. Ed. by Yu.K. Vasilchuk. Moscow, MGU Press, 2008. 571 p.
8. Budantseva N.A. *Formirovaniye povtorno-zhilnykh ldov i bugrov pucheniya v golotsene: na primere Bolshezemelskoy tundry i severa Zapadnoy Sibiri. Avtoref. Dis. kand. nauk* [Formation of ice wedges and Pingo in the Holocene: by the example of Bolshezemelskaya tundra and northern West Siberia. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2003. 32 p.
9. Vasilchuk Y.K., Budantseva N.A., Christiansen H.H., Chizhova Ju.N., Vasil'chuk A.C., Zemskova A.M. Oxygen stable isotope variation in late Holocene ice wedges in Yamal peninsula and Svalbard. *Geography, environment, sustainability*, 2015, no. 8 (3), pp. 36–54.
10. Kirpotin S., Polishchuk Y., Bryksina N., Sugaipova A., Kouraev A., Zakharova E., Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kolmakova M., Manassypov R., Dupre B. West Siberian palsa peatlands: distribution, typology, hydrology, cyclic development, present-day climate-driven changes and impact on CO₂ cycle. *International Journal of Environmental Studies*, 2011, no. 68, pp. 603–623.
11. Tyrtikov A.P. *Vliyaniye rastitelnogo pokrova na promerzaniye i protaivaniye gruntov* [Vegetation effects on freezing and thawing of soils]. Moscow, Moscow University Press, 1969. 192 p.
12. Lenz J., Grosse G., Jones B.M., Walter Anthony K.M., Bobrov A., Wulf S., Wetterich S. Mid-Wisconsin to Holocene permafrost and landscape dynamics based on a drained lake basin core from the northern Seward Peninsula, northwest Alaska. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2016, no. 27 (1), pp. 56–75.
13. Van Huissteden J., Berrittella C., Parmentier F.J.W., Mi Y., Maximov T.C., Dolman A.J. Methane emissions from permafrost thaw lakes limited by lake drainage. *Nature Climate Change*, 2011, no. 1, pp. 119–123.
14. Vardy S.R., Warner B.G., Aravena R. Holocene climate and the development of a subarctic peatland near Inuvik, Northwest Territories, Canada. *Climate Change*, 1998, no. 40, pp. 285–313.
15. Zibulski R., Herzsich U., Pestryakova L.A., Wolter J., Müller S., Schilling N., Wetterich S., Schirmermeister L., Tian F. River flooding as a driver of polygon dynamics: modern vegetation data and a millennial peat record from the Anabar River lowlands (Arctic Siberia). *Biogeosciences*, 2013, no. 10, pp. 5703–5728.
16. Jones B.M., Arp C.D. Observing a catastrophic thermokarst lake drainage in northern Alaska. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2015, no. 26, pp. 119–128.
17. Briffa K.R., Melvin T.M., Osborn T.J., Hantemirov R.M., Kiryanov A.V., Mazepa V.S., Shiyatov S.G., Esper J. Reassessing the evidence for tree-growth and inferred temperature change during the Common Era in Yamalia, northwest Siberia. *Quaternary Science Reviews*, 2013, no. 72, pp. 83–107.
18. *Geokriologiya SSSR. Zapadnaya Sibir* [Geocryology of the USSR. Western Siberia]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 454 p.
19. *The All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center*. Available at: <http://meteo.ru> (accessed 03 December 2015).
20. Slagoda E.A., Ermak A.A. Interpretation of exogenous processes in typical tundra of the Yamal peninsula (case study of the district in the middle Yuribey river). *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, no. 4, Nauka o zemle, pp. 28–38. In Rus.
21. Preis Yu.I. Detailed reconstruction of bog functional state as a response to continental climate changes in Holocene (the middle taiga of Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, no. 2, pp. 90–102. In Rus.
22. Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hafliadason H., Hajdas I., Hatté C., Heaton T.J., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Turney C.S.M., van der Plicht J. IntCal13 and MARINE13 radiocarbon age calibration curves 0–50000 years cal BP. *Radiocarbon*, 2013, no. 55 (4), pp. 869–1887.
23. Stuiver M., Reimer P.J., Reimer R.W. 2013, *CALIB 7.0.2 Manual*. Available at: <http://calib.qub.ac.uk/calib/download/> (accessed 21 October 2015).
24. Ramenskiy L.G., Tsatsenkin I.I., Chizhikov O.N., Antipin N.A. *Ekologicheskaya otsenka kormovykh ugodiy po rastitelnomu pokrovu* [Ecological evaluation of the fodder lands by vegetation cover]. Moscow, Selkhozgiz Publ., 1956. 472 p.
25. Babeshina L.G., Zverev A.A. Estimation of habitat conditions of West Siberian Plain sphagnum mosses: moisture factor. *Tomsk State University Journal of biology*, 2010, no. 331, pp. 185–192. In Rus.
26. Elina G.A., Yurkovskaya T.K. Methods for determining paleoecological regime as the basis objectification of the causes of mire vegetation successions. *Botanicheskii zhurnal*, 1992, vol. 77, no. 7, pp. 120–124. In Rus.
27. Lapshin E.D. *Flora bolot yugo-vostoka Zapadnoy Sibiri* [Flora in mires of Western Siberia southeast]. Tomsk, TGU Press, 2003. 296 p.
28. Korolyuk A.Yu., Troeva E.I., Cherosov M.M., Zakharova V.I., Gogoleva P.A., Mironova S.I. *Ekologicheskaya otsenka flory i rastitelnosti Tsentralnoy Yakutii* [Ecological assessment of flora and vegetation of Central Yakutia]. Yakutsk, YaNTs SO RAN Publ., 2005. 108 p.
29. Jones M.C., Camill P., Gallego-Sala A., Garneau M., Harden J.W., Hugelius G., Klein E.S., Kokfelt U., Kuhry P., Loisel J., Mathijssen P.J.H., O'Donnell J.A., Oksanen P.O., Ronkainen T.M., Sannel A.B.K., Talbot J., Tarnocai C., Valiranta M. Effects of permafrost aggradation on peat properties as determined from a pan-Arctic synthesis of plant macrofossils. *Biogeosciences*, 2016, no. 121 (1), pp. 78–94.
30. Moskalenko N.G., Ponomareva O.E., Kazantseva L.A., Ustinova E.V. Monitoring ekzogenykh geologicheskikh protsessov na trassee gazoprovoda Nadym–Punga [Monitoring of exogenous geological processes on the route of Nadym–Punga gas pipeline]. *Inzhenernye iziskaniya*, 2007, no. 1, pp. 34–36.
31. Blyakharchuk T.A., Klimanov V.A. Suktsessii bolotnoy rastitelnosti i klimata po dannym issledovaniya dvukh torfyanikov na yuge Zapadnoy Sibiri [Successions of mire vegetation and climate according to the study of two peatlands in the south of Western Siberia]. *Struktura i razvitie bolotnykh ekosistem i rekonstruktsiya paleogeograficheskikh usloviy. Tezisy dokladov X vserossiyskogo seminar-ekskursii* [Proc. 10th All-Union seminar tours. Structure and development of wetland ecosystems and reconstruction of the paleogeographic conditions]. Tallinn, 1989. pp. 45–49.
32. Blyakharchuk T.A. Western Siberia, a review of Holocene climatic changes. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 2009, no. 2 (1), pp. 4–12.
33. Volkova V.S., Gnibidenko Z.N., Goryacheva A.A. Klimaticheskaya ritmika golotsena tsentralnoy chasti Zapadno-Sibirskoy ravniny (palinologiya, magnetizm) [Holocene climatic rhythm of the central part of the West Siberian Plain (palynology, magnetism)]. *Osnovnye zakonomernosti globalnykh i regionalnykh izmeneniy klimata i prirodnoy sredy v pozdnem kaynozoe Sibiri* [Main regularities of global and regional climate change and the environment in the Late Cenozoic of Siberia]. Novosibirsk, Institute of Archaeology and Ethnography SO RAN Publ., 2002. pp. 48–57.
34. Preis Yu.I., Bobrov V.A., Budashkina V.V., Gavshin V.M. Estimate of flows of mineral substance by the properties of peat deposits of Bakchar bog (southern taiga of Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 1, pp. 43–47. In Rus.

35. Preis Yu.I., Kurina I.V. Rekonstruktsiya vysokogo razresheniya paleokotopov bolot yuzhnoy taygi Zapadnoy Sibiri kak otklik na izmeneniya klimata golotsena [High-resolution reconstruction of mire paleokotopes of southern taiga of Western Siberia as a response to Holocene climate change]. *Issledovanie prirodno-klimaticheskikh protsessov na territorii Bolshogo Vasyuganskogo bolota* [Research of Natural and Climatic Processes on the Great Vasyugan Mire]. Ed. by M.V. Kabanov. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2012. pp. 14–38.
36. Preis Yu.I. Paleokriogennye protsessy v torfyanykh otlozheniyakh yuga lesnoy zony Zapadnoy Sibiri [Paleocryogenic processes in peat sediments of southern forest zone of Western Siberia]. *Klimatologiya i glyatsiologiya Sibiri. Materialy Mezhdunarodnoy Nauchno-Prakticheskoy Konferentsii* [Proc. Int. Scient. and Pract. Conf. Climatology and glaciology of Siberia]. Tomsk, 2012. pp. 226–227.
37. Preis Yu.I. Dynamics of ridge-lake complex of Iksinskoye bog (Western Siberia) as a response to climate change in the second half of the Holocene. *Geography and Natural Resources*, 2016, no. 2, pp. 94–103. In Rus.
38. Asselin H., Payette S. Origin and long-term dynamics of a subarctic tree line. *Ecoscience*, 2006, no. 13 (2), pp. 135–142.
39. Bhiry N., Payette S., Robert E.C. Peatland development at the arctic tree line (Quebec, Canada) influenced by flooding and permafrost. *Quaternary Research*, 2007, no. 67, pp. 426–437.
40. Åhman, R. C14 dating an palsar i Nord-Norge. *Svensk Geografisk Arsbok*, 1969, no. 45, pp. 155–158.
41. Vorren K.-D., Vorren B. The problem of dating a palsa: two attempts involving pollen diagrams, determination of moss subfossils, and ¹⁴C datings. *Astarte*, 1975, no. 8, pp. 73–81.
42. Payette S., Delwaide A. Dynamics of subarctic wetland forests over the past 1500 years. *Ecological Monograph*, 2004, no. 74, pp. 373–391.
43. Arlen-Pouliot Y., Bhiry N. Palaeoecology of a palsa and a filled thermokarst pond in a permafrost peatland, subarctic Quebec, Canada. *The Holocene*, 2005, no. 15 (3), pp. 408–419.
44. Roberts B.A., Simon N.P.P., Deering K.W. The forests and woodlands of Labrador, Canada: ecology, distribution and future management. *Ecological Research*, 2006, no. 21 (6), pp. 868–880.
45. Kuhry P. Palsa and peat plateau development in the Hudson Bay Lowlands, Canada: timing, pathways and causes. *Boreas*, 2008, no. 37 (2), pp. 316–327.
46. Loisel J., Garneau M. Late Holocene paleoecohydrology and carbon accumulation estimates from two boreal peat bogs in eastern Canada: Potential and limits of multi-proxy archives. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, no. 291, pp. 493–533.
47. Van Bellen S., Garneau M., Booth R.K. Holocene carbon accumulation rates from three ombrotrophic peatlands in boreal Quebec, Canada: impact of climate-driven ecohydrological change. *The Holocene*, 2011, no. 21, pp. 1217–1231.
48. Wetzel H., Fleige H., Horn R. *Degradation of palsas in the region of Northern-Norway*. Germany, IPNSS Publ., 2005. 10 p.
49. Zuidhoff F.S., Kolstrup E. Changes in palsa distribution in relation to climate change in Laivadal, northern Sweden, especially 1960–1997. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2000, no. 11 (1), pp. 55–69.
50. Seppälä M. Palsa mire in Finland. *The Finnish environment*, 2006, no. 23, pp. 155–162.
51. Vorren K.-D. Stratigraphical investigations of a palsa bog in northern Norway. *Astarte*, 1972, no. 5 (1–2), pp. 39–71.
52. Vorren K.-D. Recent palsa datings, a brief survey. *Norsk geografisk tidskrift*, 1979, no. 33, pp. 217–219.
53. Oksanen P.O. *Development of palsa mires on the Northern European continent in relation to Holocene climatic environmental changes*. Academic Diss. Oulu, 2005. 50 p.
54. Lamentowicz M., Słowiński M., Marcisz K., Zielińska M., Kaliszan K., Lapshina E., Gilbert A., Buttler A., Fiałkiewicz-Kozieł B., Jassey V.E.J., Lagoun-Defarge F., Kołaczek P. Hydrological dynamics and fire history of the last 1300 years in western Siberia reconstructed from a high-resolution, ombrotrophic peat archive. *Quaternary Research*, 2015, no. 84 (3), pp. 312–325.
55. Shiyatov S.G. Rates of changes in the upper treeline ecotone in the Polar Urals Mountains. *PAGES News*, 2003, no. 11 (1), pp. 8–10.
56. Demezhko D.Yu., Shchapov V.A. 80,000 years ground surface temperature history inferred from the temperature-depth log measured in the superdeep hole SG-4 (the Urals, Russia). *Global and Planetary Change*, 2001, no. 29 (1–2), pp. 167–178.
57. Naurzbaev M.M., Vaganov E.A. Variation of early summer and annual temperature in east Taymir and Putoran (Siberia) over the last two millennia inferred from tree rings. *Journal of Geophysical Research*, 2000, no. 105 (6), pp. 7317–7326.
58. Marcisz K., Tinner W., Colombaroli D., Kołaczek P., Słowiński M., Fiałkiewicz-Kozieł B., Łokas E., Lamentowicz M. Long-term hydrological dynamics and fire history during the last 2000 years in CE Europe reconstructed from a high-resolution peat archive. *Quaternary Science Reviews*, 2015, no. 112, pp. 138–152.
59. Feurdean A., Gałka M., Kuske E., Tanjau I., Lamentowicz M., Florescu G., Liakka J., Hutchinson S.M., Mulch A., Hickler T. Last Millennium hydro-climate variability in Central-Eastern Europe (Northern Carpathians, Romania). *The Holocene*, 2015, vol. 25, no. 7, pp. 1179–1192.
60. Wanner H., Solomina O., Grosjean M., Ritz S.P., Jetel M. Structure and origin of Holocene cold events. *Quaternary Science Reviews*, 2011, no. 30, pp. 3109–3123.
61. Bolshiyakov D.Yu., Makarov A.S., Morozov E.A., Pavlov M.V., Savatyugin L.M. Development of natural environment of the Earth polar regions of the last millennium according to the study of lakes bottom sediments. *Problems of the Arctic and Antarctic*, 2009, no. 1 (81), pp. 108–115. In Rus.
62. Khotinsky N.A. *Golotsen severnoy Evrazii* [The Holocene of northern Eurasia]. Moscow, Nauka Press, 1977. 198 p.
63. Ellis C.J., Rochefort L. Century-scale development of polygon-patterned tundra wetland, Bylot island (738 N, 808 W). *Ecology*, 2004, no. 85 (4), pp. 963–978.
64. Kirpotin S.N., Blyakharchuk T.A., Vorobyov S.N. Dinamika subarkticheskikh ploskobugrystykh bolot Zapadno-Sibirskoy ravniny kak indikator globalnykh klimaticheskikh izmeneniy [Dynamics of subarctic flat mound mires of West Siberian Plain as an indicator of global climate changes]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*, 2003, no. 7, pp. 122–134.

Received: 7 August 2016.

Information about the authors

Yulia I. Preis, Cand. Sc., leading researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Galina V. Simonova, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Elena A. Slagoda, Dr. Sc., chief researcher, Earth Cryosphere Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; leading research worker, Tyumen State University; senior research worker, Industrial University of Tyumen.

УДК 665.61+543.42

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕФТЕЙ И ПРОЦЕСС ОСАДКООБРАЗОВАНИЯ

Ануфриев Роман Викторович¹,
slaymer89@mail.ru

Волкова Галина Ивановна¹,
galivvol@yandex.ru

¹ Институт химии нефти СО РАН,
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4.

Актуальность работы обусловлена необходимостью получения детальной информации о влиянии ультразвуковой обработки на структурно-механические свойства высоkozастывающих нефтей Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции для решения проблем, возникающих при их добыче и транспортировке.

Цель работы: определение вязкостно-температурных характеристик и энергетических параметров обработанных в ультразвуковом поле парафинистой и высокопарафинистой нефтей; установление влияния ультразвуковой обработки на процесс образования и групповой состав асфальтосмолопарафиновых отложений в высокопарафинистой нефти.

Методы исследования: ротационная вискозиметрия, криоскопия в бензоле, жидкостно-адсорбционная хроматография, метод «холодного пальца», ИК-Фурье-спектроскопия.

Результаты. Проведена обработка высокопарафинистой и парафинистой нефтей в акустическом поле с частотой 24 кГц и интенсивностью излучения 10 Вт/см². Ультразвуковая обработка высокопарафинистой нефти приводит к увеличению реологических параметров (вязкость и напряжение сдвига), теплоты активации вязкого течения, удельной энергии разрушения нефтяной дисперсной системы, температуры застывания и количества асфальтосмолопарафиновых отложений. В осадках обработанной нефти с высоким содержанием парафинов увеличивается массовая доля высокомолекулярных n-алканов и снижается доля и средняя молекулярная масса асфальтенов. Акустическая обработка парафинистой нефти способствует улучшению вязкостно-температурных и энергетических характеристик при оптимальном времени воздействия. Проведенные исследования показывают, что ультразвуковая обработка, как и любой другой метод, может быть как весьма эффективен, так и дать отрицательный результат. Кратковременная обработка (30 с) парафинистых нефтей с высоким содержанием смолисто-асфальтеновых компонентов приводит к существенному снижению вязкости, что позволит снизить цену углеводородного сырья при добыче и транспортировке. Вязкость и температура застывания высокопарафинистой нефти, обработанной ультразвуком, после снятия ультразвуковой нагрузки и охлаждения образца повышаются. Но и для таких нефтей возможно применение ультразвука, если транспортировать нефть, разогретую под действием ультразвука, до момента начала кристаллизации парафиновых углеводородов.

Ключевые слова:

Нефть, ультразвуковая обработка, компонентный состав, вязкость, температура застывания, осадкообразование, ИК-спектроскопия.

Введение

Сырая нефть в обычных условиях представляет собой коллоидно-дисперсную систему. Интенсификация процессов добычи, подготовки и транспорта нефти может быть достигнута путем существенного изменения сил межмолекулярного взаимодействия и степени дисперсности нефтяной системы. Для достижения этой цели применяют: смешение сырьевых потоков, тепловые, химические, физические (электрическое и магнитное поля, ультразвук) и комплексные методы воздействия. Применение физических методов воздействия, включая акустические с излучателями ультразвукового диапазона частот, интенсифицировалось в настоящее время в связи с конструированием ультразвуковых аппаратов и разработкой новых технологий для решения практических задач в нефтяной отрасли [1–5]. Использование ультразвуковых колебаний при добыче нефти позволяет увеличить проницаемость призабойной зоны пластов, вовлечь в разработку низкопроницаемые и закольматированные пропластики, сни-

зить вязкость, провести очистку резервуаров, деталей нефтяного оборудования от отложений.

Основные ресурсы нефти России сосредоточены в Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. Нефти месторождений Западной Сибири малосернистые, но часто парафинистые и высокопарафинистые, поэтому их вязкость в зимний период достигает таких значений, что энергозатраты на перекачку значительно повышают стоимость добываемой нефти, а в некоторых случаях делают ее практически невозможной. В настоящее время для транспортировки нефтей с высокой температурой застывания предлагается использовать ультразвуковую обработку (УЗО), а также комплексное воздействие, включающее УЗО и последующее разбавление химическими реагентами или введение полимерных присадок [6–14]. Результаты этих работ часто противоречивы в связи с разными условиями эксперимента: акустические установки отличаются конструкцией и мощностью, различны время и температура обработки, а самое главное – используются объекты различного компонентного

состава. Поэтому необходимо проведение систематических исследований, направленных на выявление основных закономерностей, объясняющих поведение и коллоидно-химические свойства нефтяной дисперсной системы (НДС) после акустического воздействия.

Данная работа посвящена определению вязкостно-температурных характеристик двух образцов нефти различного компонентного состава, обработанных ультразвуком, а также исследованию процесса осадкообразования и состава осадков в высокопарафинистой нефти после ультразвукового воздействия.

Экспериментальная часть

Влияние УЗО на структурно-механические свойства рассматривается на примере высокопарафинистой высокосмолистой нефти (*Нефть I*) и парафинистой высокосмолистой нефти (*Нефть II*) месторождений Западной Сибири. Нефтяные образцы перед обработкой были осушены безводным кальцием хлористым. Массовую долю асфальтенов в нефти и нефтяных осадках определяли «холодным» способом Гольде [15]. Используя метод жидкостно-адсорбционной хроматографии на силикагеле, проводили разделение мальтенов на масла и смолы. Масла элюировали смешанным растворителем гексан-толуол (70:30 по объему), смолы – смесью этанол-толуол (50:50 по объему) [15]. Реологические свойства объектов исследовали с использованием вискозиметра Brookfield DV-III ULTRA. Обработку измерений осуществляли с помощью программного обеспечения Rheocalc и MS Office. Для определения температуры застывания (T_z) нефтей использовали прибор ИНПН «Кристалл». Физико-химические свойства исследуемых нефтей представлены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-химические свойства исследуемых нефтей
Table 1. Physico-chemical properties of the crude oils

Нефть Oil	Температура застывания, °C Pour point, °C	Содержание, мас. %/Content, wt. %		
		Масла (в том числе парафинистые углеводороды) Saturates (including paraffinic hydrocarbons)	Силикагелевые смолы Silica gel resins	Асфальтены Asphaltenes
Нефть I Oil I	5	80,0 (12,1)	17,5	2,5
Нефть II Oil II	–7	77,7 (2,9)	15,5	6,8

Ультразвуковую обработку нефтей проводили в реакторе с использованием преобразователя МСП 1/24, который соединен с генератором МУГ 4/18–27 мощностью 4 кВт. Упругие колебания создавались стержневым волноводом (диаметр рабочего торца 20 мм) с амплитудой колебаний 5–10 мкм при резонансной частоте 24 кГц [16]. В реактор периодического действия вносили 300 г образца и обрабатывали в течение заданного вре-

мени. Температуру в реакторе поддерживали на уровне 25–35 °C. Непосредственно после обработки образца измеряли вязкость, температуру застывания и определяли количество асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО). По зависимостям напряжения сдвига от скорости сдвига прямого и обратного хода рассчитывали удельную энергию разрушения НДС. Процесс образования осадков исследовали на установке, работающей по методу «холодного пальца». Температура «пальца» составляла 12 °C, температура нефти – 30, 50 и 70 °C. Полученные осадки фракционировали согласно стандартным методикам [15]. ИК-спектры нефтей и осадков из растворов в CHCl_3 регистрировали на FTIR-спектрометре NICOLET 5700 в области 400–4000 см^{-1} . Обработку ИК-спектров и определение оптической плотности осуществляли с помощью программного обеспечения OMNIC 7.2 Thermo Nicolet Corporation. Среднюю молекулярную массу асфальтенов определяли методом криоскопии в бензоле [17].

Результаты и их обсуждение

Зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига (кривые течения) нефтей, представленные на рис. 1, характеризуют исследуемые нефти как неньютоновские жидкости. Степень структурирования нефтей существенно возрастает при приближении к температуре застывания. Температурное влияние на реологические параметры ярко выражено для *Нефти I*, характеризующейся более высоким содержанием парафиновых углеводородов и смол: при скорости сдвига 5,6 с^{-1} напряжение сдвига (τ) растет с 3 до 38 Па, эффективная вязкость (μ) – с 63 до 680 мПа·с при температурах 50 и 20 °C соответственно.

Зависимости эффективной вязкости от температуры имеют точки перегиба при температурах, приближенных к точке начала кристаллизации парафинов в нефтях. При температуре ниже 30 °C для *Нефти I* и 20 °C для *Нефти II* наблюдается скачкообразное увеличение вязкости, связанное с фазовым переходом в НДС. Вязкостно-температурная зависимость выражается двумя линейными функциями с точкой перегиба (рис. 2). Температурные зависимости вязкости используют для определения энергетических параметров течения НДС, в частности энергии активации вязкого течения (ΔE_a), которая рассчитывается по тангенсу угла наклона линейных участков зависимости $\ln \mu = f(1/TK)$ [18]. Как видно из рис. 2, реологические свойства нефтей характеризуются двумя значениями ΔE_a . Величина ΔE_a высокопарафинистой *Нефти I* уже в температурном интервале 20–30 °C составляет 176 кДж/моль, для парафинистой *Нефти II* значительный рост энергии активации наблюдается при температурах ниже 20 °C. Полученные значения ΔE_a , отражающие усредненные эффекты межмолекулярных взаимо-

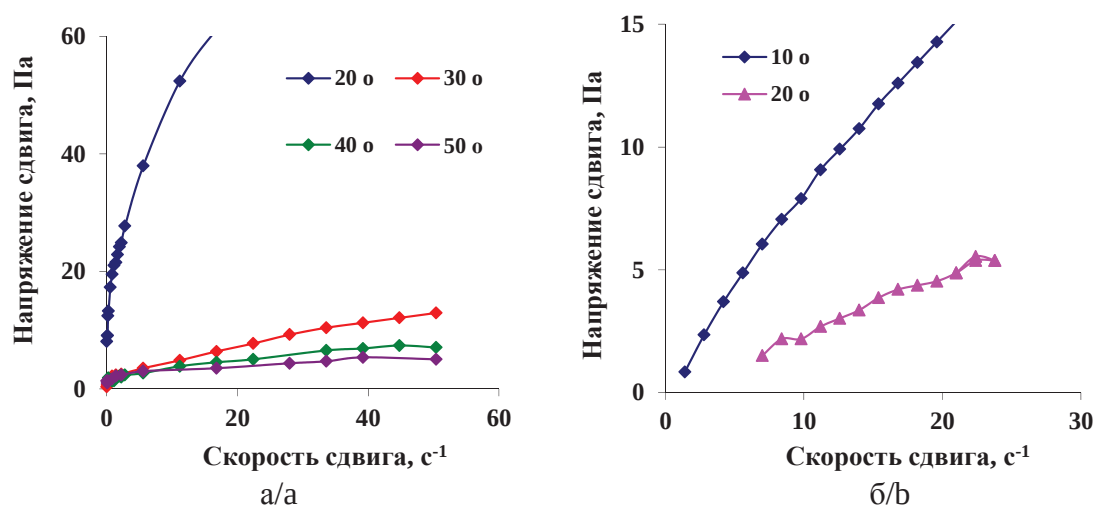


Рис. 1. Реологические зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига для Нефти I (а) и Нефти II (б) при различных температурах

Fig. 1. Rheological dependence of shear stress on shear rate for Oil I (a) and Oil II (b) at different temperatures

действий различного типа, значительно превышают силы вандерваальсова взаимодействия (10 кДж/моль) при температурах, приближенных к температуре застывания, и выше для высокопарафинистой нефти.

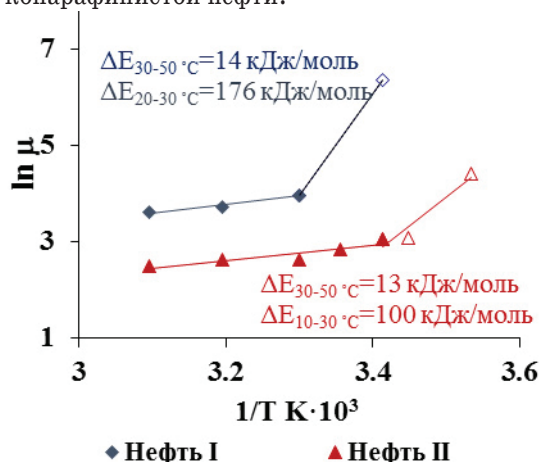


Рис. 2. Температурная зависимость логарифма эффективной вязкости нефтей при скорости сдвига 9 с^{-1}

Fig. 2. Temperature dependence of the effective oil viscosity logarithm at shear rate of 9 с^{-1}

Резкое увеличение реологических параметров (рис. 1, 2) при понижении температуры нефтей с высоким содержанием парафинов делает проблематичным их транспорт при отрицательных температурах. В работе исследована возможность применения УЗО для снижения вязкости, температуры застывания и образования АСПО в выбранных нефтях.

Обработка высокопарафинистой Нефти I приводит к повышению напряжения сдвига и вязкости в 2,0–3,6 раза (табл. 2). Температура застывания нефти после УЗО возрастает и составляет 5, 9,

9 и 10 °C для исходной нефти и 5, 10 и 15 мин УЗО соответственно (табл. 2). Дальнейшее увеличение продолжительности УЗО, вплоть до 60 мин, не приводит к изменению температуры застывания.

Таблица 2. Влияние времени ультразвуковой обработки на структурно-механические свойства Нефти I

Table 2. Effect of sonication time on structural-mechanical properties of the Oil I

Время ультразвуковой обработки, мин Sonication time, min	Температура застывания, °C Pour point, °C	Вязкость, мПа·с* Viscosity, mPa·s	Напряжение сдвига, Па* Shear stress, Pa	Энергия разрушения, кДж/м³ Fracture energy, kJ/m³	Скорость осадкообразования, г/мин Sedimentation rate, g/min
Исходная Initial	5	145	12,3	8	0,180
5	9	522	44,3	36	0,358
10	9	320	27,5	9	0,383
15	10	330	28,0	2	0,547

Примечание. *Вязкость, напряжение сдвига при 20 °C и скорости сдвига 9 с^{-1} .

Note. *Viscosity, shear stress at 20 °C and shear rate of 9 с^{-1} .

Известно, что нефти с высоким содержанием парафиновых углеводородов являются тиксотропными дисперсными системами. Тиксотропия проявляется в существовании петли гистерезиса, которую образуют кривые зависимости «напряжение сдвига – скорость сдвига» прямого (ступенчатое увеличение скорости сдвига) и обратного (ступенчатое снижение скорости сдвига) хода. Гистерезисные явления в нефтях обычно связывают с запаздыванием процессов восстановления структуры после снятия нагрузки или с недостаточным разрушением исходной структуры. Площадь пет-

ли гистерезиса между восходящей и нисходящей кривыми течения равна работе (энергии), потраченной на разрушение надмолекулярной структуры НДС в цилиндре ротационного вискозиметра. По методике, представленной в работе [19], рассчитаны величины удельной энергии разрушения (ΔW) надмолекулярной структуры исходной и обработанной ультразвуком нефти.

Для *Нефти I*, обработанной в течение 5 мин, величина ΔW возрастает в 4 раза (рис. 3, табл. 2). При увеличении времени УЗО площади петель гистерезиса, следовательно, и значения ΔW , уменьшаются, а после 15 мин обработки кривые течения прямого и обратного хода практически сливаются. Однако значения динамической вязкости и напряжения сдвига обработанной нефти существенно превышают эти величины для исходной нефти. Снижение площади петли гистерезиса при увеличении времени обработки (и значений ΔW) может быть обусловлено образованием прочной структуры, которая не разрушается под действием сдвигового напряжения.

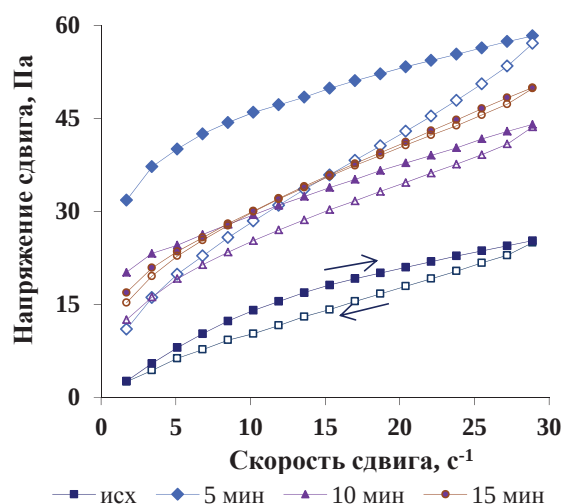


Рис. 3. Петли гистерезиса Нефти I после ультразвуковой обработки; температура 20 °С

Fig. 3. Hysteresis loops of the Oil I after sonication; 20 °C

Изменение структурно-механических свойств *Нефти I* после УЗО отражается на процессе образования АСПО в нефти. Определено количество осадка и рассчитана скорость его образования. Экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что при температуре нефти 30 °С скорость осадкообразования возрастает при увеличении времени УЗО (табл. 3). При повышении температуры обработанной нефти до 50 °С приращение скорости снижается, а при 70 °С скорость осадкообразования не зависит от времени УЗО.

УЗО высокопарафинистой нефти приводит не только к росту массы АСПО, но и к изменению их группового состава: увеличивается доля масляной фракции и снижается содержание силикагелевых смол и асфальтенов (табл. 4). Снижение содержа-

ния асфальтенов в осадках связано, вероятно, с тем, что после обработки нефти увеличивается степень дисперсности агрегатов асфальтенов и, следовательно, повышается их седиментационная устойчивость в дисперсионной среде. О повышении степени дисперсности свидетельствует существенное снижение молекулярной массы асфальтенов, выделенных из осадков обработанной нефти: средняя молекулярная масса асфальтенов составляет 825 и 357 а. е. м. для осадков исходной и обработанной нефти соответственно.

Таблица 3. Влияние продолжительности ультразвуковой обработки Нефти I на скорость образования асфальтосмолопарафиновых отложений

Table 3. Effect of sonication time of the Oil I on the rate of wax deposit formation

Время ультразвуковой обработки, мин Sonication time, min	Скорость осадкообразования, г/мин Sedimentation rate, g/min		
	Температура нефти, °С/Oil temperature, °C		
	30	50	70
Исходная/Initial	0,180	0,067	0,053
5	0,358	0,120	0,062
10	0,383	0,131	0,067
15	0,547	0,162	0,070

Примечание. Температура «холодного пальца» 12 °С.

Note. Temperature of the «cold finger» is 12 °C.

Таблица 4. Влияние ультразвуковой обработки на групповой состав осадков Нефти I

Table 4. Effect of ultrasonic treatment on the group composition of the wax deposit derived from the Oil I

Время ультразвуковой обработки, мин Sonication time, min	Содержание, мас. % Content, wt. %		
	Масла Saturates	Силикагелевые смолы Silica gel resins	Асфальтены Asphaltenes
Исходная/Initial	73,8	22,6	3,6
5	76,1	22,2	1,7
10	77,0	21,5	1,5
15	79,7	20,0	1,3

Примечание. Температура нефти 30 °С, температура «холодного пальца» 12 °С.

Note. Oil temperature is 30 °C, temperature of the «cold finger» 12 °C.

Структурно-групповой состав осадков определяли с использованием данных ИК-спектроскопии. В ИК-спектрах сырых нефтей и их фракций обнаруживаются практически все характеристические полосы поглощения (п. п.) основных функциональных групп [20]. Многокомпонентность состава, внутри- и межмолекулярные связи в НДС обуславливают сложную картину перекрывания и наложения п. п. с искажением их формы и интенсивности, поэтому часто прямая качественная интерпретация, а тем более количественные расчеты, связывающие интенсивность поглощения с содержанием той или иной функциональной группы,

невозможны. Задача упрощается при анализе узких фракций нефти. ИК-спектроскопия сырых нефтей находит применение посредством расчета спектральных коэффициентов и результаты представляются в виде нормированных оптических плотностей (D).

Для характеристики масляных фракций, выделенных из нефти и осадков, использовали соотношения полос, приведенных в табл. 5. Для определения относительного содержания структурных фрагментов в исследуемых образцах рассчитывали спектральные коэффициенты с использованием в качестве реперов п. п. 1380, 1465 и 1600 см^{-1} [21]. Ароматичность масел определяли по отношению интенсивностей п. п. всех ароматических $\text{C}=\text{C}$ -связей (1600 см^{-1}) и алифатических $\text{C}-\text{H}$ -связей (1465 см^{-1}). Структуру углеводородной части масляной фракции нефти и осадков оценивали также по показателям алифатичность и разветвленность, характеризующих долю парафиновых фрагментов по отношению к ароматическим и строение парафиновых структур соответственно. Алифатичность рассчитывали по соотношению суммарной интенсивности п. п. метиленовых групп в парафиновых цепях с числом атомов углерода >4 (720 см^{-1}) и метильных групп (1380 см^{-1}) относительно ароматических $\text{C}=\text{C}$ -связей (1600 см^{-1}) ($\Sigma\text{CH}_2+\text{CH}_3/\text{C}=\text{C}_{\text{аром}}$); разветвленность – из отношения интенсивностей п. п. CH_3 (1380 см^{-1}) / CH_2 (1465 см^{-1}) [21].

Таблица 5. Структурно-групповой состав фракции масел Нефти I и осадков по данным ИК-фурье-спектроскопии

Table 5. Structural and group composition of fraction of the Oil I and sediments according to FT-IR spectroscopy

Образец/время обработки, мин Sample/sonication time, min	Спектральные коэффициенты, отн. ед. Spectral coefficients, rel. un.			
	D_{1600}/D_{1465}	D_{1380}/D_{1465}	D_{725}/D_{1380}	$\Sigma D_{725}+D_{1380}/D_{1600}$
Нефть I/исходная Oil I/initial	0,070	0,493	0,468	10,283
Нефть I/5 Oil I/5	0,074	0,520	0,448	10,153
Нефть I/15 Oil I/15	0,075	0,529	0,448	10,143
Осадок/0 Sediment/0	0,053	0,458	0,452	11,260
Осадок/5 Sediment/5	0,059	0,466	0,435	11,324
Осадок/10 Sediment/10	0,066	0,497	0,449	10,986
Осадок/15 Sediment/15	0,062	0,484	0,430	11,106

Из табл. 5 видно, что ароматичность и разветвленность масел как нефти, так и осадков растет при увеличении времени обработки, вероятно, за счет миграции ароматических и разветвленных углеводородов из состава сложных структурных

единиц (ССЕ) в дисперсионную среду. Отношение интенсивностей п. п. D_{725}/D_{1380} характеризует содержание CH_2 - и CH_3 -групп в парафиновых цепях и используется для оценки средней молекулярной массы н-алканов [20]. Отношения D_{725}/D_{1380} для обработанных образцов, по сравнению с исходными, снижаются (табл. 5). Уменьшение средней молекулярной массы масел нефти после УЗО связано, по-видимому, с диффузией низкомолекулярных н-алканов из оболочки ССЕ. Что касается осадков, то уменьшение коэффициента D_{725}/D_{1380} , а, следовательно, и средней молекулярной массы н-алканов, связано с окклюзией низкомолекулярных н-алканов высокомолекулярными в процессе кристаллизации.

Таким образом, полученные результаты показывают, что УЗО высокопарафинистой нефти приводит к значительному увеличению вязкости, температуры застывания и количества АСПО при увеличении времени обработки.

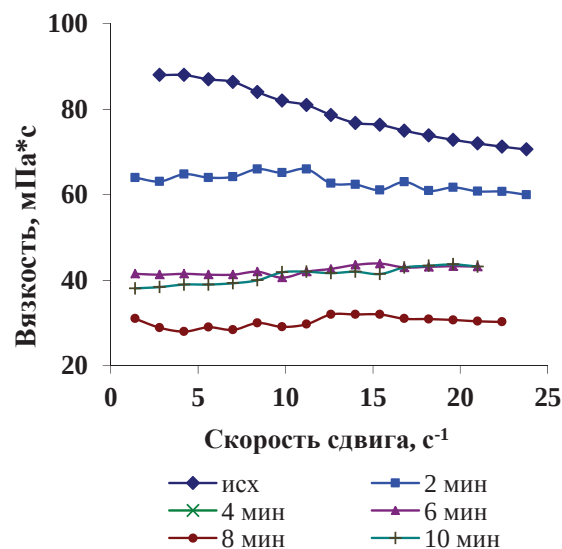


Рис. 4. Влияние времени ультразвуковой обработки на динамическую вязкость Нефти II; температура 10 °C

Fig. 4. Effect of sonication time of the Oil II on dynamic viscosity; 10 °C

Исследования, проведенные ранее [8–12], показали, что результат акустического воздействия зависит от компонентного состава нефти. В отличие от высокопарафинистой Нефти I, ультразвуковая обработка парафинистой Нефти II способствовала улучшению ее вязкостно-температурных характеристик. Увеличение времени УЗО вплоть до 8 мин приводит к снижению динамической вязкости во всем исследованном интервале скоростей сдвига (рис. 4). Например, эффективная вязкость при скорости сдвига 9 с^{-1} в точке минимума уменьшается в 2,8 раза (табл. 6). Зависимости температуры застывания и величины удельной энергии разрушения надмолекулярной структуры нефти также носят экстремальный характер, минимум этих ха-

рактических приходится на 6–8 мин обработки (табл. 6). Низкие значения ΔW для обработанной нефти свидетельствуют о разрушении межмолекулярных связей в акустическом поле, поэтому снижается степень структурированности нефти, о чем свидетельствует вид реологических кривых, представленных на рис. 4.

Таблица 6. Влияние ультразвуковой обработки на вязкостно-температурные и энергетические параметры Нефти II

Table 6. Effect of the ultrasonic treatment on the viscosity-temperature and the energetic parameters of the Oil II

Время ультразвуковой обработки, мин Sonication time, min	Вязкость, мПа·с* Viscosity, mPa·s*	Температура застывания, °C Pour point, °C	Энергия разрушения, кДж/м³ Fracture energy, kJ/m³
Исходная/Initial	82	–7	9,51
2	65	–9	1,71
4	41	–10	0,61
6	39	–11	0,56
8	29	–11	0,51
10	42	–7	1,28

Примечание. Скорость сдвига 9 c^{-1} , температура $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Note. Shear rate is 9 s^{-1} , $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Заключение

Ультразвуковая обработка высокопарафинистой Нефти I приводит к увеличению вязкости,

температуры застывания, энергии активации вязкого течения, удельной энергии разрушения дисперсной системы и количества асфальтосмолопарафиновых отложений. В составе осадков возрастает массовая доля масляной фракции за счет окклюзии низкомолекулярных n-алканов высокомолекулярными в процессе кристаллизации. Снижение доли асфальтенов в осадках, выделенных из обработанной Нефти I, обусловлено, вероятно, ростом седиментационной устойчивости асфальтеновых агрегатов в связи с повышением их степени дисперсности.

Структурно-механические параметры парафинистой нефти с высоким содержанием смолисто-асфальтеновых компонентов (Нефть II) существенно улучшаются после обработки. Для Нефти II оптимальное время обработки составило 8 мин, при этом вязкость уменьшилась в 2,8 раза, температура застывания – на $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Энергия активации вязкого течения и удельная энергия разрушения дисперсной системы после 8 мин воздействия снижаются в 7,5 и 2,2 раза соответственно. Улучшение структурно-механических характеристик парафинистой нефти после ультразвуковой обработки объясняется разрушением межмолекулярных связей и перераспределением компонентов нефти между дисперсной фазой и дисперсионной средой нефтяной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Промтов М.А., Авсеев А.С. Импульсные технологии переработки нефти и нефтепродуктов // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2007. – № 6. – С. 22–24.
- Ультразвуковые multifunctional и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве / В.Н. Хмелев, Г.В. Леонов, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов. – Барнаул: АлтГТУ, 2007. – 400 с.
- Mullakaev M.S. Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery // Journal of petroleum science and engineering. – 2015. – № 125. – P. 201–208.
- Sonochemical approaches to enhanced oil recovery / V.O. Abramov, A.V. Abramova, V.M. Bayazitov, L.K. Altunina, A.S. Gerasin, D.M. Pashin // Ultrasonics Sonochemistry. – 2015. – V. 25. – P. 76–81.
- Application of ultrasound on crude oil pretreatment / Ye. Guoxiang, Lu. Xiaoping, H. Pingfang, P. Fei, W. Yanru // Chemical engineering and processing. – 2008. – № 47. – P. 2346–2350.
- Волкова Г.И., Ануфриев Р.В., Юдина Н.В. Влияние ультразвука на состав и свойства парафинистой высокосмолистой нефти // Нефтехимия. – 2016. – Т. 56. – № 5. – С. 454–460.
- Плисс А.А., Золотов В.П., Якимов А.В. Влияние ультразвука на физико-химические свойства нефти // Интервал. – 2007. – № 3. – С. 36–38.
- Klokov T.P., Volodin Yu.A., Glagoleva O.F. Effect of ultrasound on the colloidal-disperse properties of petroleum systems // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2006. – № 42. – P. 43–46.
- Ультразвуковая обработка нефтей для улучшения вязкостно-температурных характеристик / Г.И. Волкова, И.В. Прозорова, Р.В. Ануфриев, Н.В. Юдина, М.С. Муллакаев, В.О. Абрамов // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2012. – № 2. – С. 3–6.
- Effect of ultrasonic irradiation on rheological properties of asphaltic crude oils / S.M. Mousavi, A. Ramazani, I. Najafi, S. Davachi // Petroleum Science. – 2012. – V. 9. – № 1. – P. 82–88.
- Исследование воздействия ультразвуковой обработки и химических реагентов на реологические свойства нефти Лузановского месторождения / М.С. Муллакаев, В.О. Абрамов, О.М. Градов, В.М. Новоторцев, И.Л. Еременко // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2011. – № 11. – С. 23–28.
- Influence of Ultrasound and Heat Treatment on the Rheological Properties of Ust-Tegusskoe Oil / M.S. Mullakaev, D.F. Asylbaev, V.G. Prachkin, G.I. Volkova // Chemical and Petroleum Engineering. – 2014. – V. 47. – P. 584–587.
- Mullakaev M.S., Volkova G.I., Gradov O.M. Effect of Ultrasound on the Viscosity-Temperature Properties of Crude Oils of Various Compositions // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2015. – V. 49. – № 3. – P. 287–296.
- The integrated effect on properties and composition of high-paraffin oil sludge / R.V. Anufriev, G.I. Volkova, A.A. Vasilyeva, A.V. Petukhova, N.V. Usheva // Procedia Chemistry. – 2015. – V. 15. – P. 2–7.
- Современные методы исследования нефтей: справочно-методическое пособие / под ред. А.И. Богомолова, М.Б. Темьянко, Л.И. Хотынцевой. – Л.: Недра, 1984. – 431 с.
- Анализ эффективности передачи ультразвуковых колебаний в нагрузку / О.В. Абрамов, В.О. Абрамов, В.В. Артемьев,

- М.С. Муллакаев // Акустический журнал. – 2009. – Т. 55. – № 3. – С. 1–17.
17. Гельфман М.И. Практикум по физической химии / под ред. М.И. Гельфмана. – СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2004. – 254 с.
18. Виноградов Г.В., Малкин А.Я. Реология полимеров. – М.: Химия, 1977. – 440 с.
19. Энергетика гидромеханического разрушения структуры высокопарафинистых нефтей / В.П. Выговской, В.А. Данекер, С.В. Рикконен, А.И. Теплов // Автоматизация и информационное обеспечение технологических процессов в нефтяной промышленности. – Томск: Изд-во ТГУ, 2002. – Т. 2. – 408 с.
20. Инструментальные методы исследования нефти. – Новосибирск: Наука, 1987. – 136 с.
21. Structural features of asphaltene and petroleum resin fractions / L.M. Petrova, N.A. Abbakumova, T.R. Foss, G.V. Romanov // Journal Petroleum Chemistry. – 2011. – V. 51. – № 4. – P. 252–257.

Поступила 04.07.2016 г.

Информация об авторах

Ануфриев Р.В., аспирант Института химии нефти СО РАН.

Волкова Г.И., кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института химии нефти СО РАН.

UDC 665.61+543.42

INFLUENCE OF ULTRASONIC TREATMENT ON STRUCTURAL-MECHANICAL PROPERTIES OF OIL AND SEDIMENTATION

Roman V. Anufriev¹,

slaymer89@mail.ru

Galina I. Volkova¹,

galivvol@yandex.ru

¹ Institute of Petroleum Chemistry Russian Academy of Sciences, Siberian Branch,
4, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634055, Russia.

The relevance of the work is caused by the need to obtain the detailed information on the effect of ultrasonic treatment on structural and mechanical properties of crude oils of West Siberian oil and gas province to solve the problems, arising in their recovery and transportation.

The aim of the work is to determine the viscosity-temperature characteristics and energy parameters of the paraffinic and highly paraffinic crude oils treated in ultrasonic field; to establish the effect of sonication on formation and group composition of wax deposit in highly paraffinic crude oil.

The methods of the investigation: rotary viscosimetry, pour point, cryoscopy in benzene, liquid-adsorption chromatography, method of «cold finger», wax deposit, FT-IR spectroscopy.

The results. The authors have carried out the ultrasonic treatment of the highly paraffinic and paraffinic crude oils with the frequency of 24 kHz and a radiation intensity of 10 W/cm². It was found that the ultrasonic treatment of the paraffinic crude oils leads to increase of rheological parameters (viscosity and shear stress), heat of viscous flow activation, energy of destruction of the oil dispersed systems, pour point and amount of wax deposits. After sonication in the sediment of the highly paraffinic crude oil, the proportion of high-molecular n-alkanes increases and the mass fraction of asphaltenes and their average molecular weight decreases. The ultrasonic treatment of the paraffinic crude oil leads to improve the viscosity-temperature and energetic characteristics at the optimal exposure time. The studies showed that the ultrasonic treatment, as well as any other method, might be both the most effective and give a negative result. Short-term treatment (30 sec) of the paraffinic crude oils with high content of resin-asphaltene components leads to significant decrease in viscosity, which will reduce the price of hydrocarbons at production and transport. Sonication of the paraffinic crude oil leads to increase of viscosity and pour point. However, highly paraffinic crude oils, heated by the action of the ultrasound, must be transported before the beginning of crystallization of the paraffinic hydrocarbons.

Key words:

Crude oil, ultrasonic treatment, component composition, viscosity, pour point, deposition, FT-IR spectroscopy.

REFERENCES

- Promtov M.A., Avseev A.S. Pulse technologies for refining oil and oil products. *Neftepererabotka i neftehimija*, 2007, no. 6, pp. 22–24. In Rus.
- Khmelev V.N., Leonov G.V., Barsukov R.V., Tsyganok S.N., Shalunov A.V. *Ultrazvukovye mnogofunktsionalnye i spetsializirovannye apparaty dlya intensivatsii tekhnologicheskikh protsessov v promyshlennosti, sel'skom i domashnem khozyaystve* [Ultrasonic multifunctional and specialized equipment for intensification of technological processes in industry, agriculture and households]. Barnaul, AltGT Publ., 2007. 400 p.
- Mullakaev M.S. Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery. *Journal of petroleum science and engineering*, 2015, no. 125, pp. 201–208.
- Abramov V.O., Abramova A.V., Bayazitov V.M., Altunina L.K., Gerasin A.S., Pashin D.M. Sonochemical approaches to enhanced oil recovery. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2015, vol. 25, pp. 76–81.
- Guoxiang Ye., Xiaoping Lu., Pingfang H., Fei P., Yanru W. Application of ultrasound on crude oil pretreatment. *Chemical engineering and processing*, 2008, no. 47, pp. 2346–2350.
- Volkova G.I., Anufriev R.V., Yudina N.V. Effect of Ultrasonic Treatment on the Composition and Properties of Waxy High-Resin Oil. *Petroleum Chemistry*, 2016, vol. 56, no. 5, pp. 454–460. In Rus.
- Pliss A.A., Zolotov V.P., Yakimov A.V. Effect of ultrasonic treatment on physical and chemical properties of oil. *Interval*, 2007, no. 3, pp. 36–38. In Rus.
- Klokov T.P., Volodin Yu.A., Glagoleva O.F. Effect of ultrasound on the colloidal-disperse properties of petroleum systems. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2006, no. 42, pp. 43–46.
- Volkova G.I., Prozorova I.V., Anufriev R.V., Yudina N.V., Mullakaev M.S., Abramov V.O. Ultrasonic treatment of oils for improvement of viscosity-temperature characteristics. *Neftepererabotka i neftehimija*, 2012, no. 2, pp. 3–6. In Rus.
- Mousavi S.M., Ramazani A., Najafi I., Davachi S. Effect of ultrasonic irradiation on rheological properties of asphaltenic crude oils. *Petroleum Science*, 2012, vol. 9, no. 1 (9), pp. 82–88.
- Mullakaev M.S., Abramov V.O., Gradov O.M., Novotortsev V.M., Eremenko I.L. Study of the effects of ultrasound and chemical reagents on rheological properties of oil of Luzanovskoe oil field. *Neftepererabotka i neftehimija*, 2011, no. 11, pp. 23–28. In Rus.
- Mullakaev M.S., Asylbaev D.F., Prachkin V.G., Volkova G.I. Influence of Ultrasound and Heat Treatment on the Rheological Properties of Ust-Teguskskoe Oil. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2014, vol. 47, pp. 584–587.
- Mullakaev M.S., Volkova G.I., Gradov O.M. Effect of Ultrasound on the Viscosity-Temperature Properties of Crude Oils of Various Compositions. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2015, vol. 49, no. 3, pp. 287–296.

14. Anufriev R.V., Volkova G.I., Vasilyeva A.A., Petukhova A.V., Usheva N.V. The integrated effect on properties and composition of high-paraffin oil sludge. *Procedia Chemistry*, 2015, vol. 15, pp. 2–7.
15. *Sovremennye metody issledovaniya neftey* [Modern methods of studying crude oils]. Eds. A.I. Bogomolov, M.B. Temyanko, L.I. Khotyntseva. Leningrad, Nedra Publ., 1984. 431 p.
16. Abramov O.V., Abramov V.O., Mullakaev M.S., Artemev V.V. The Efficiency of Ultrasonic Oscillations Transfer into the Load. *Acoustical Physics*, 2009, no. 6 (55), pp. 894–909. In Rus.
17. Gelfman M.I. *Praktikum po fizicheskoy khimii* [Workshop on Physical Chemistry]. Ed. by M.I. Gelfman. St-Petersburg; Moscow; Krasnodar, Lan Publ., 2004. 254 p. In Rus.
18. Vinogradov G.V., Malkin A.Ya. *Reologiya polimerov* [Rheology of polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 1977. 440 p.
19. Vygovskoy V.P., Daneker V.A., Rikkonen S.V., Teplov A.I. Energetika gidromekhanicheskogo razrusheniya struktury vysokoparafinistyk neftey [Hydromechanical energy of destroying the structure of high-paraffin oils]. *Avtomatizatsiya i informatsionnoe obespechenie tekhnologicheskikh protsessov v neftyanoy promyshlennosti* [Automation and Information Support of Operating Procedures in Oil Industry]. Ed. by A.K. Khorkov. Tomsk, TSU Press, 2002. Vol. 2, pp. 224–229.
20. *Instrumentalnye metody issledovaniya nefti* [Instrumental methods for oil investigation]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1987. 136 p.
21. Petrova L.M., Abbakumova N.A., Foss T.R., Romanov G.V. Structural features of asphaltene and petroleum resin fractions. *Journal Petroleum Chemistry*, 2011, vol. 51, no. 4, pp. 252–257.

Received: 4 July 2016.

Information about the authors

Roman V. Anufriev, postgraduate, Institute of Petroleum Chemistry Russian Academy of Sciences, Siberian Branch.

Galina I. Volkova, Cand. Sc., scientific supervisor, Institute of Petroleum Chemistry Russian Academy of Sciences, Siberian Branch.

УДК 624.131

РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ ПО СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ ОСЕДАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА В ЮЖНОЙ ЯКУТИИ

Строкова Людмила Александровна¹,
strokova@sibmail.com

Ермолаева Алёна Викторовна¹,
alyona7@inbox.ru

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

Актуальность работы обусловлена ростом аварийности на линейной части магистральных газопроводов в труднодоступных, малонаселенных и малоосвоенных регионах, вследствие неконтролируемого развития опасных геологических процессов в сложных природно-климатических условиях.

Цель работы: оценка и прогноз локализации оседания земной поверхности в зоне влияния магистрального газопровода в южной Якутии. Задачи: выявление критериев состояния геологической среды, способствующих оседанию поверхности, разработка методики районирования по степени опасности процесса оседания в геоинформационной системе.

Методика исследования: анализ материалов инженерно-геологических изысканий для проектирования объектов линейной инфраструктуры магистрального газопровода «Сила Сибири» на участке «Чаянда–Ленск», подборка картографического материала, разработка структуры данных в геоинформационной системе, критериев районирования по степени опасности карстового и термокарстового процессов; построение картографических схем в геоинформационной системе, выделение опасных, потенциально-опасных и неопасных участков по трассе магистральных газопроводов.

Результаты. Рассмотрены основные и особые нагрузки и воздействия на магистральный газопровод. Отмечено влияние процессов оседания земной поверхности на возникновение дополнительных механических напряжений в стенке трубопровода. Определены опасные инженерно-геологические процессы, приводящие к оседанию земной поверхности на участке «Чаянда–Ленск» магистрального газопровода «Сила Сибири». Разработана информационная база по инженерно-геологическим условиям строительства, определены критерии отнесения участка газопровода к опасным, потенциально-опасным, неопасным. Построены схемы районирования территории по степени опасности, вследствие карстового и термокарстового процессов. Предложено использование в дальнейшем полученных данных для предварительной оценки трубопровода на прочность и устойчивость на опасных участках.

Ключевые слова:

Магистральные газопроводы, оценка риска, напряженно-деформированное состояние, геоинформационные системы, карст, термокарст.

Введение

В настоящее время перспективы развития газовой отрасли неотъемлемо связаны с такими регионами, как Иркутская область, п-ов Ямал, о. Сахалин, Республика Саха (Якутия), находящихся в сложных природно-климатических условиях. Существующие нормативные документы в области проектирования магистральных трубопроводов в достаточной мере обеспечивают надежность Единой системы газоснабжения (далее – ЕСГ), в то же время вероятность возникновения аварийных ситуаций, инцидентов, отказов, инициированных природными факторами, сохраняется.

Одной из причин данной тенденции, по данным ООО «Газпром ВНИИГАЗ» [1], является изменение природных систем под воздействием техногенной нагрузки. Кроме того, отмечается активизация опасных процессов и явлений на стадиях строительства и эксплуатации, которые в ненарушенных условиях не фиксировались и не представляли опасности. Также немаловажен тот факт, что проектирование, строительство и эксплуатация трубопроводных систем ведется в малоосвоенных регионах, где регулярные наблюдения за опасны-

ми природными процессами и явлениями охватывают непродолжительный период, таким образом, расчет параметров зданий и сооружений будет проводиться исходя из необъективных данных.

Напряженно-деформированное состояние любого несущего элемента линейной части магистрального газопровода однозначно определяется характеристиками воздействующих на него нагрузок [2–10]. Эти нагрузки изменяются в зависимости от характеристик окружающей среды, параметров перекачиваемого продукта и т. п. Все нагрузки и воздействия на магистральный газопровод подразделяются на постоянные и временные, которые в свою очередь делятся на длительные, кратковременные и особые.

Особыми нагрузками и воздействиями на магистральные газопроводы принято называть те, которые возникают в результате деформаций грунтовых оснований. Эти нагрузки должны определяться на основании данных анализа грунтовых условий и их возможного изменения в процессе строительства и эксплуатации трубопровода [11].

Важную роль при возникновении особых нагрузок на магистральные газопроводы играют про-

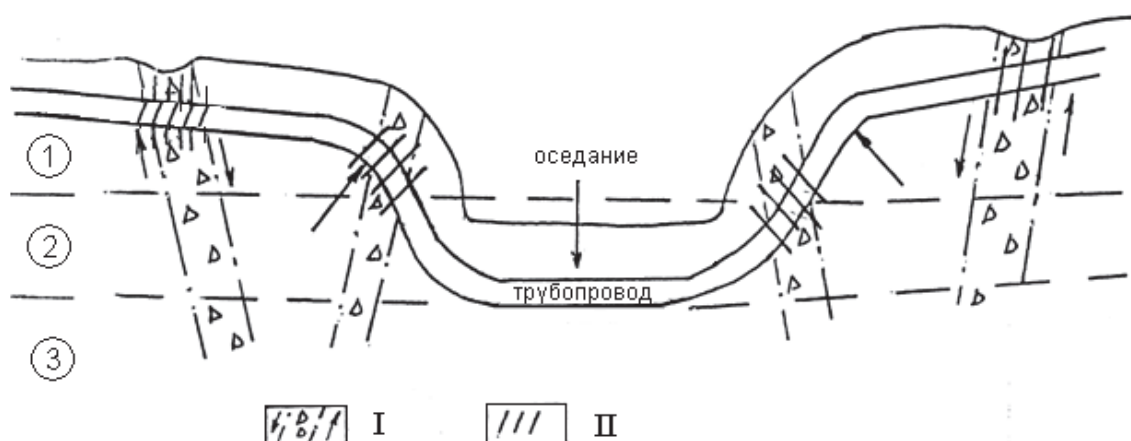


Рис. 1. Схема формирования мульды оседания земной поверхности и дополнительных напряжений в системе труба – массив горных пород: I – тектонически ослабленные зоны, определяющие блоковый характер векторных деформаций земной коры; II – дополнительные напряжения на металле трубопровода в связи с формированием мульды оседания земной поверхности из-за развития карстово-суффозионных и эрозионно-тектонических форм. Гидродинамические зоны: 1 – аэрация или вертикальной нисходящей циркуляции вод; 2 – переходная; 3 – зона постоянного горизонтального стока [12]

Fig. 1. Scheme of formation of earth surface subsidence trough and additional stresses in the pipe – rock massif system: I are the tectonically weakened zones which determine block character of earth crust vector deformation; II are the additional stresses on pipeline metal due to formation of earth surface subsidence trough owing to development of karst-suffosion and erosion-tectonic forms. Hydrodynamic areas of: 1 – aeration or vertical descending water circulation; 2 – transition; 3 – constant horizontal drainage [12]

цессы оседания земной поверхности. Данные процессы оказывают существенное влияние на рельеф поверхности земли, формируя мульды оседания (рис. 1) на значительных площадях [12].

При воздействии данных процессов на трубопровод возникают дополнительные механические напряжения, что в конечном счете усиливает влияние других дефектов в стенке магистрального газопровода. Дополнительные нагрузки, воздействующие в период эксплуатации, приводят к быстрому износу трубопровода. Самыми распространенными и опасными являются непроектные нагрузки под воздействием вышеупомянутых источников, которые практически невозможно учесть при проектировании. Выявлять действие непроектных нагрузок возможно на стадии строительства и эксплуатации путем расчета напряженно-деформированного состояния трубопровода на участках оседания земной поверхности.

Объект и методика исследования

На сегодняшний день инвестиционный проект «Магистральный газопровод "Сила Сибири"» является одним из крупнейших проектов ПАО «Газпром». Осуществление данной программы позволит увеличить рост уровня социально-экономического развития республики Саха (Якутия), Амурской области, реализовать экспортный потенциал страны, ориентированный на Азиатско-Тихоокеанский регион.

В связи с вышеизложенным рассмотрим перспективы возникновения процессов оседания земной поверхности строящегося газопровода «Сила Сибири» в Южной Якутии, на участке «Чаян-

да-Ленск» протяженностью 160 км. На данной территории оседание поверхности, способствующее возникновению механических напряжений в металле трубопровода, приводящее к снижению его эксплуатационной надежности, может быть вызвано карстом и термокарстом.

Для достижения поставленной цели выполнены следующие этапы работы. На первом этапе был проведен анализ имеющихся материалов комплексных инженерных изысканий, рассмотрены природные условия оседания поверхности, подобран соответствующий картографический материал. Обработка данных была организована с применением программных продуктов ГИС MapInfo Professional и AutoCAD [13–15]. На втором этапе было проведено ранжирование по степени опасности вследствие карстовых и термокарстовых процессов.

В данной работе использовались следующие исходные данные:

- материалы комплексных инженерных изысканий, выполненных ФГУП «ВостСиб АГП», ООО «Промнефтегазпроект», ООО «Ингеоком», ОАО «Фундаментпроект» по объекту «Магистральный газопровод "Сила Сибири"», участок «Чаянда-Ленск», 0–160 км [16];
- государственная геологическая карта (листы Р-49-XXX, Р-49-XXXVI, Р-50-XXV, Р-50-XXVI, Р-50-XXXI, Р-50-XXXII);
- топографические карты (листы Р-49-XXXV-XXXVI, Р-49-XXIX-XXX, Р-50-XXXI-XXXII, Р-50-XXV-XXVI).

В геоинформационной системе MapInfo Professional использовался послойный принцип организации информации. Были построены следую-



Рис. 2. Общая структура данных в геоинформационной системе

Fig. 2. General structure of the data in the geographic information system

щие информационные таблицы (слои): скважины, государственная геологическая карта, карта четвертичных отложений, гидрография, геофизические исследования, участки с развитием карста (рис. 2).

Основным векторным информационным слоем в данной работе является слой «Скважины». Данный слой содержит информацию о составе и свойствах пород в инженерно-геологическом разрезе. Фактический материал по скважинам составляет более 1500 единиц, в базе данных указаны следующие характеристики грунта: вид грунта по ГОСТ 25100, льдистость, влажность на границе текучести, влажность на границе раскатывания, число пластичности, модуль деформации, влажность за счет незамерзшей воды, плотность грунта, плотность сухого грунта, предел прочности на одноосное сжатие (в воздушно-сухом состоянии, при водонасыщении), льдистость за счет ледяных

включений. Пример интерпретации геолого-литологической колонки скважины в ГИС представлен на рис. 3.

На всем протяжении трассы магистральный газопровод пересекает значительное количество водотоков, в связи с этим разработан слой «гидрография», источником для которого послужили материалы инженерно-экологических изысканий (рис. 4).

В ходе маршрутных наблюдений при проведении инженерных изысканий по трассе трубопровода зафиксированы участки проявлений поверхностного и глубинного карста в виде блюдцев, зон разуплотнения. Данный критерий внесен в разработанную базу данных (рис. 5).

Государственная геологическая карта является растровым слоем, служащим для определения линеаментов – характерных форм рельефа, приуроченных к зонам повышенной трещиноватости (рис. 6).

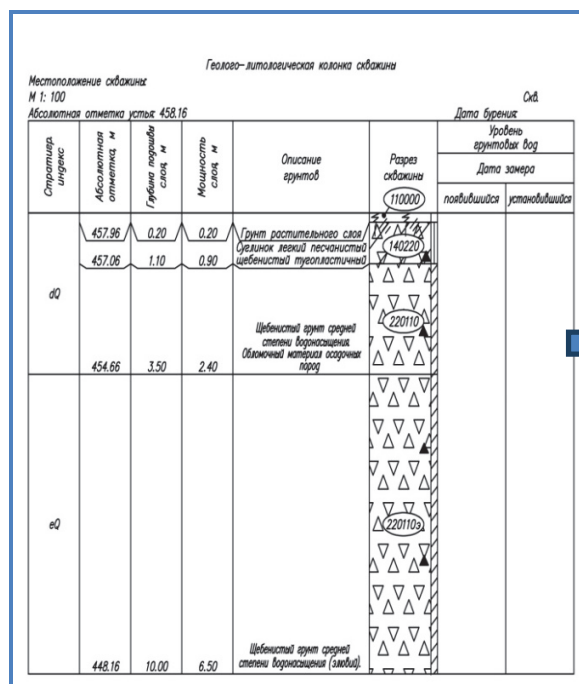


Рис. 3. Схема формирования данных геолого-литологической колонки в ГИС

Fig. 3. Scheme of formation of the geological-lithological column data in GIS

№	X	Y	H	Мощность слоя, м	Классификация грунта по ГОСТ 25100-2011 (разновидность)	Классификация грунта по ГОСТ 25100-2011 (разновидность)
скв. 69	xxx	xxx	458,16	0,2	грунт растительного слоя	
скв. 69	xxx	xxx	457,96	0,9	суглинок	легкий, песчанистый, щебенистый, тугопластичный
скв. 70	xxx	xxx	457,06	2,4	грунт щебенистый	средней степени водонасыщенный
скв. 69	xxx	xxx	454,66	6,5	грунт щебенистый	средней степени водонасыщенный (эпювий)



Рис. 4. Фрагмент слоя «Гидрография»

Fig. 4. Portion of a layer «Hydrography»

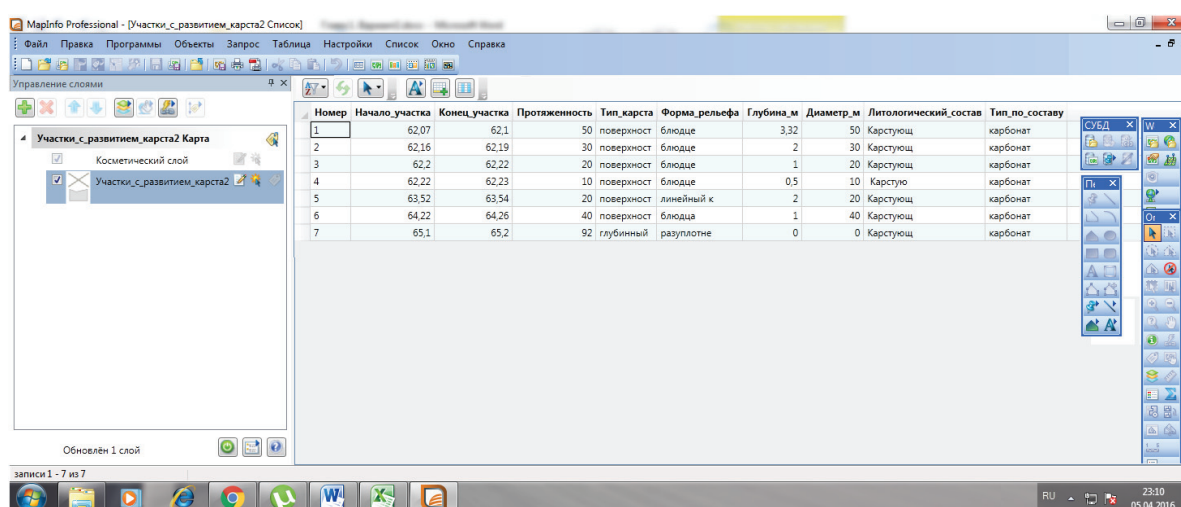


Рис. 5. Слой «Участки с развитием карста» в ГИС «Mapinfo Professional» в форме таблицы

Fig. 5. Layer «Sites with karst development» in «Mapinfo Professional» in the form of a table

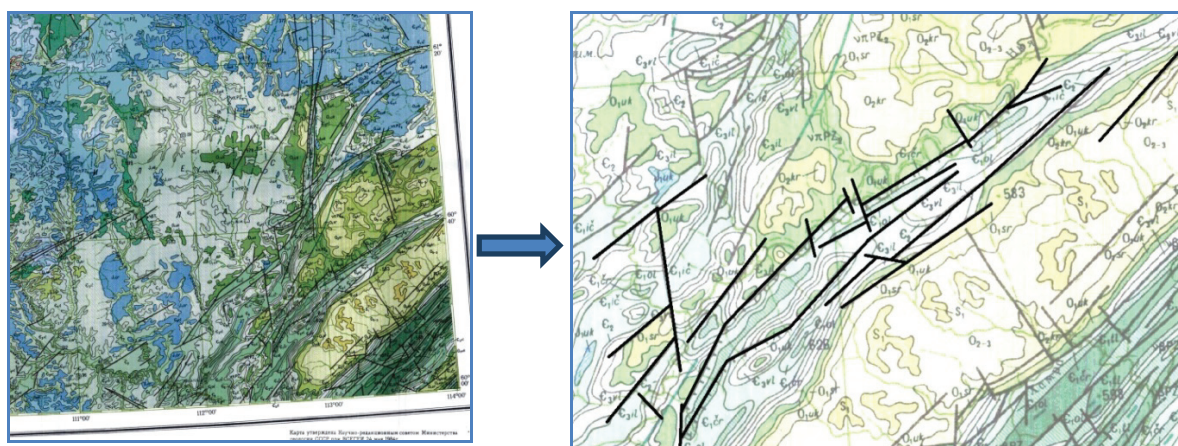


Рис. 6. Фрагмент государственной геологической карты и слой «Линеаменты» в ГИС

Fig. 6. Part of the state geological map and layer «Lineaments» in GIS

Таким образом, была разработана информационная база по инженерно-геологическим условиям территории строительства.

Одним из методов прогнозирования опасных природных процессов является районирование территории строительства по степени опасности проявления процесса.

Под геологической опасностью понимается возможность (угроза) проявления геологических процессов, способных наносить материальный ущерб [17]. Анализ необходимости выполнения инженерной защиты и выбор ее проектного варианта следует осуществлять на основании оценки риска опасных геологических процессов с учетом прогнозируемых предотвращенных потерь (ущерба и социальных потерь). Для выбора оптимального варианта инженерной защиты технические и технологические решения и мероприятия должны быть обоснованы и содержать оценки экономического, социального и экологического эффектов при осуществлении конкретного варианта или отказе от него. Расчеты и оценки, связанные с соответствующими обоснованиями, должны основываться на исходных материалах одинаковой точности, детальности и достоверности, на единой нормативной базе, одинаковой степени проработки вариантов, идентичном круге учитываемых затрат и результатов. Сравнение вариантов инженерной защиты при различии в результатах их осуществления должно учитывать затраты, необходимые для приведения их к сопоставимому виду. При определении экономического эффекта инженерной защиты в размер ущерба должны быть включены потери от воздействия опасных геологических процессов и затрат на компенсацию последствий от этих воздействий.

Анализ публикаций, посвященных оценке опасности карста, свидетельствует, что эта проблема в целом разработана, благодаря исследованиям Ф.П. Саваренского (1939), Г.А. Максимовича (1963, 1969), И.В. Попова (1959), Н.А. Гвоздецкого (1972, 1981), К.А. Горбуновой (1977, 1979, 1992), В.Н. Дублянского (1984, 1992), Г.Н. Дублянской (1992, 1998), В.П. Зверева (1967), В.М. Кутепова (1989), А.Г. Лыкошина (1968, 1992), И.А. Парабучева (1992), И.А. Печеркина (1966, 1969), И.А. Саваренского (1962, 1990, 1995), Д.С. Соколова (1962), А.В. Ступишина (1947, 1954, 1967, 1972), В.В. Толмачева (1980, 1986, 1990, 2004), Ю.Б. Трждинского (1977, 1999), В.Н. Андрейчука (1995, 1999, 2001), В.Н. Катаева (2001, 2004), Е.В. Колосова (1984, 2000), А.В. Лехова (1986), Н.А. Миронова (1977, 1988, 1995), А.И. Печеркина (1983, 1986), В.П. Хоменко (1986, 2003), К.С. Джонсона (2004), Ф. Ройтера (1981), Х. Молека (2004) и многих других крупных ученых и практиков. Ими были установлены основные закономерности карстового процесса и роль отдельных факторов в его развитии, разработаны показатели и классификации как самого процесса, так и его проявлений, созданы методы изучения, оценки устой-

чивости и районирования карстоопасных территорий. Хотя до сих пор отмечаются значительные расхождения в понимании содержания основных терминов, так нет единого определения карстовой опасности, не разработаны общие правила, последовательность ее определения.

Для региональной оценки карстовой опасности до последнего времени использовались в основном качественные методы, основу которых составляет районирование территорий преимущественно по инженерно-геологическим факторам формирования карста (Горбунова и др., 1992; Катаев, 2001; Абдрахманов и др., 2002). В отдельных случаях данная операция дополняется оценкой факторов карстообразования в баллах, их суммированием и типизацией на этой основе ранее обособленных таксонов районирования по степени их опасности или устойчивости относительно карстовых деформаций [20].

Общепринятой интегральной мерой карстовой опасности до последнего времени являлась среднелетняя интенсивность провалообразования, предложенная З.А. Макеевым (1948). Существует несколько классификаций и методов количественной прогнозной оценки карстовой опасности или устойчивости территорий для карстовых провалов, разработанных И.А. Саваренским (1967, 1995, СП 11–105–97 (часть II)), В.В. Толмачевым (1980, 1986), Ф. Ройтером и др. (1981). Данные методы позволяют устанавливать интенсивность или вероятность образования провалов определенных размеров. Но они практически не применимы для региональной оценки карстовой опасности больших по площади территорий, малонаселенных и слабоизученных в геологическом отношении, какой является южная Якутия. Как уже было отмечено ранее, для территории проектирования объекта отсутствуют многолетние наблюдения о наличии и развитии геологических процессов. Учитывая вышеизложенное, предлагается оценивать участки трассы по степени предрасположенности к карстовому процессу, исходя из региональных и зональных геологических факторов инженерно-геологических условий территории.

Результаты и их обсуждение

Анализ публикаций о количественных вероятностно-статистических интегральных показателях опасности проявления карста [2, 8, 12, 18, 19], нормативных рекомендаций, имеющих данных инженерных изысканий позволил отобрать следующие группы показателей: структурно-тектонические, гидрогеологические, геологические, геоморфологические, геофизические.

В качестве показателей, характеризующих карстовую опасность, выбраны следующие: количество пересечений линейного объекта с линиями, глубина установившихся грунтовых вод, показатель агрессивности подземных вод, наличие карстующихся пород, наличие/отсутствие водопора, удаленность от речной сети, наличие поверх-



Рис. 8. Схема районирования по степени опасности термокарста

Fig. 8. Zoning according to thermokarst hazard ranking

При оценке опасности термокарста необходимо учитывать опыт проектирования, строительства и эксплуатации первого нефтепровода в криолитозоне – «ВСТО-1». Почти треть трассы данного сооружения расположена в зоне массивно-островного распространения многолетнемерзлых грунтов, оттаивание которых может вызвать недопустимые изменения планово-высотного положения трубопровода и угрозу его функционирования.

Для развития процесса термокарста особую озабоченность вызывают участки с льдогрунтами, пластовыми и полигонально-жильными подземными льдами. Основным фактором, увеличивающим опасность проявления термокарста, является изменение теплообмена на поверхности почвы, при котором глубина сезонного оттаивания начинает превышать глубину залегания подземного льда или сильнольдистых многолетнемерзлых пород. При вырубке просеки для эксплуатации магистрального газопровода происходит изменение глубины сезонного оттаивания-промерзания, что приводит к оттаиванию подземного льда и, как следствие, к проявлению термокарста.

Таблица 2. Критерии опасности развития термокарста

Table 2. Indicators of thermokarst hazards

Участок/Area	Показатели/Indicators
Опасный Dangerous	Наличие в инженерно-геологическом разрезе мономинеральных залежей льда мощностью более 0,1 м Presence of monomineralic ice (depth more than 0,1 m) in geological column
Потенциально опасный Potentially dangerous	Наличие в инженерно-геологическом разрезе пород с льдистостью ($i_{\text{лг}}$ д. е. > 0,3) Presence of ice content in rocks (unit fraction > 0,3) in geological column
Неопасный Safe	Отсутствие в инженерно-геологическом разрезе пород с льдистостью > 0,3 и мономинеральных залежей льда Absence of ice content rocks (unit fraction > 0,3) and monomineralic ice in geological column

Для определения опасных участков предлагается следующий алгоритм: анализ геолого-литологических колонок скважин для определения участков трассы с наличием подземных льдов (опасный участок) и сильнольдистых пород (потенциально опасный участок) (табл. 2).

Путем выборок в ГИС MapInfo Professional выделены зоны по степени опасности развития термокарста (рис. 8), в соответствии с критериями, указанными в табл. 2.

Выводы

В работе представлены схемы районирования по степени опасности оседания земной поверхности в зоне влияния магистрального газопровода в Южной Якутии. Анализ литературных источников, данных инженерно-геологических условий района строительства газопровода позволил выявить условия и факторы оседания поверхности в результате карстового процесса и термокарста.

Выбраны критерии по каждому процессу, установлены интервалы значений показателей, характеризующихся различной степенью опасности. Пространственный анализ показателей природных условий позволил определить участки развития процессов в полосе отвода магистрального газопровода с разной долей вероятности. Выбор того или иного критерия был обусловлен, в одной стороны, необходимостью использования данных повседневной изыскательской практики и относительной простотой установления показателей природных условий, ответственных за развитие оседания, с другой стороны, максимально объективного отражения условий протекания процесса оседания.

В дальнейшем планируется расчет и оценка напряженно-деформированного состояния трубопровода на опасных участках для определения необходимости проведения компенсационных мероприятий. Полученные результаты можно использовать при обосновании применения средств инженерной защиты в проектной документации и для оптимизации мероприятий геотехнического мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власова Л.В., Ракитина Г.С., Долгов С.И. Влияние природных факторов на устойчивость функционирования Единой системы газоснабжения России. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2009. – 184 с.
2. Тигулев Е.А., Мустафин Ф.М. Оценка влияния грунтовых условий и выработка конструктивных решений по снижению напряженно-деформированного состояния трубопроводов в зонах активных тектонических разломов при подвижках грунта // Трубопроводный транспорт – 2015: материалы X Международной учебно-научно-практической конференции. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2015. – С. 320–323.
3. Ларионов В.И., Новиков П.А., Гумеров А.К. Анализ напряженно-деформированного состояния трубопровода на участках с карстами // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2012. – № 3. – С. 60–67.
4. Honegger D.G., Nyman D.J. Guidelines for the Seismic Design and Assessment of Natural Gas and Liquid Hydrocarbon Pipelines. Contract PR-268–9823. Arroyo Grande, CA: Pipeline Research Council International, Inc., 2005. 206 p.
5. Optimization of engineering solutions for thermal stabilization of saline permafrost soils at bases of structures by means of two-phase heat pipes / R.M. Bayasan, S.I. Golubin, G.P. Pustovoyt, T.V. Proshina, A.G. Korotchenko // Heat pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources: VII Minsk International Seminar. – Minsk, Belarus, 2008. – P. 367–370.
6. Ingebritsen S.E., Sanford W.E., Neuzil C.E. Groundwater in geologic processes. 2nd edition. – New York: Cambridge Univ. Press, 2006. – 536 p.
7. Baker R. Variational slope stability analysis of materials with nonlinear failure criterion // The Electronic Journal of Geotechnical Engineering. – 2005. – V. 10. – Bundle A. URL: <http://www.ejge.com/2005/Ppr0514/Ppr0514.htm> (дата обращения: 3.02.2007).
8. Carrera A. Multivariate models for landslide hazard evaluation // Mathematical Geology. – 1983. – V. 15. – № 3. – P. 403–426.
9. Kalaugher P.G., Hodgson R.L.P., Grainger P. Pre-failure strains as precursors of sliding in a coastal mudslide // Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. – 2000. – V. 33. – P. 325–334.
10. Troncone A. Numerical analysis of a landslide in soils with a strained softening behavior // Geotechnique. – 2005. – V. 55. – № 8. – P. 585–596.
11. Бурков П.В., Ключ О.В., Шатров А.Г. Исследование напряженно-деформированного состояния подземных трубопроводов, проложенных в условиях вечной мерзлоты // Проблемы геологии и освоения недр: труды XVIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, Томск, 7–11 апреля 2014 г. В 2 т. Т. 2. – С. 565–566. URL: <http://portal.tpu.ru/files/conferences/usovma/2014/tom2-2014.pdf>
12. Примеры моделирования карстовых процессов / А.Я. Гаев, Ю.А. Килин, И.Н. Алферов, Н.С. Алферова // Карстовые системы севера в меняющейся среде: материалы конф. – Пинега-Голубино, 2011. – С. 34–37.
13. Чихарев В.А. Использование геоинформационных технологий при проведении геотехнического мониторинга трубопроводного транспорта // Трубопроводный транспорт. Мониторинг и транспорт. – № 4 (32). – 2012. – С. 4–6.
14. Применение геоинформационных систем для оценки влияния природных факторов на техническое состояние магистральных газопроводов ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» / А.Н. Распутин, В.А. Желобецкий, С.Н. Куимов, К.В. Постаутов // Газовая промышленность. – 2009. – № 11. – С. 81–83.
15. Гостева А.В., Глебова Е.В., Черноплёков А.Н. Прогнозирование чрезвычайных ситуаций на магистральных газопроводах на основе результатов анализа риска // Нефть, газ и бизнес. – 2009. – № 9. – С. 68–70.
16. Технический отчет. Выполнение комплексных инженерных изысканий по объекту «Магистральный газопровод «Сила Сибири»». Участок Чаянда–Ленск. В 5 т. – Саратов: ОАО «ВНИПИгаздобыча», 2012.
17. Природные опасности России. Т. 1. Экзогенные геологические опасности / под ред. В.П. Кутепова, А.И. Шеко. – М.: Изд. фирма «КРУК», 2002. – 345 с.
18. Золотарев Д.Р., Катаев В.Н. Воздействие линейной тектоники на развитие карстовых процессов на локальном уровне // ГЕОРИСК. – 2013. – № 1. – С. 34–43.
19. Влияние геологического строения территории на распределение карстовых форм (на примере территории г. Кунгура) / В.Н. Катаев, С.В. Щербаков, Д.С. Золотарев, О.М. Лихая, Т.Г. Ковалева // Вестник Пермского университета. Научный журнал. Вып. 3. Геология. – Пермь: Изд-во Пермского ун-та, 2009. – С. 77–93.
20. Щербаков С.В., Катаев В.Н. Интегральная оценка карстоопасности урбанизированных территорий (на примере г. Кунгур) // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. – 2011. – Т. 153. – Кн. 1. – С. 203–224.

Поступила 18.07.2016 г.

Информация об авторах

Строкова Л.А., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ермолаева А.В., аспирант кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 624.131

ZONING ACCORDING TO THE HAZARD LEVEL OF EARTH SURFACE SUBSIDENCE WHEN DESIGNING THE MAIN GAS PIPELINE IN SOUTH YAKUTIA

Lyudmila A. Strokova¹,
strkova@sibmail.com

Alyona V. Ermolaeva¹,
alyona7@inbox.ru

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

Relevance of the research is caused by growth of accident rate on linear part of the main gas pipelines, owing to dangerous geological processes in low-developed regions which are in difficult climatic conditions.

The main aim of the research is to evaluate and predict localization of the earth's surface subsidence in the area of influence of the main gas pipeline in South Yakutia. Tasks: to identify the criteria of geological media state, resulting in the earth's surface subsidence constructed; to develop the zoning technique according to the subsidence degree in geoinformation system.

Research methodology: analysis of materials of engineering-geological researches for designing the objects of linear infrastructure of the main gas pipeline «Force of Siberia» on a site «Chayanda–Lensk», selection of cartographic materials, development of structural data on geographic information system, criteria of division into districts on hazard degree of karst and thermokarst processes, plot of cartographical schemes in geographic information system, allocation of dangerous, potential-dangerous sites on the route of the main gas pipelines.

The results. The authors have considered the main and super loads and impacts on the main gas pipeline. The earth surface subsidence impact on occurrence of additional mechanical tension in a pipeline wall is noted. The authors determined hazardous engineering-geological processes leading to the earth surface subsidence on a site «Chayanda–Lensk» of the main gas pipeline «Force of Siberia». The information base on engineering-geological conditions of construction was developed and the criteria of referring a site of the gas pipeline to the hazardous one, potential-hazardous, harmless are defined and allocated on groups. The authors plotted the schemes of the territory division into districts on hazard degree owing to karst and thermokarst processes and proposed to use the obtained data for preliminary estimation of the pipeline on durability and stability on hazardous sites.

Key words:

Main gas pipelines, risk evaluation, stress-strain state, GIS, karst, thermokarst.

REFERENCES

1. Vlasova L.V., Rakitina G.S., Dolgov S.I. *Vliyanie prirodnnykh faktorov na ustoychivost funktsionirovaniya Edinoy sistemy gazo-snabzheniya Rossii* [Influence of natural factors on stability of the Unified gas supply system of Russia]. Moscow, Gazprom VNI-IGAZ Publ., 2009. 184 p.
2. Tigulev E.A., Mustafin F.M. Otsenka vliyaniya gruntovykh uslovy i vyrabotka konstruktivnykh resheny po snizheniyu napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya truboprovodov v zonakh aktivnykh tektonicheskikh razlomov pri podvizhnykh grunta [Evaluation of soil conditions effect and development of constructive solutions to reduce stress-strain state of pipelines in areas of active tectonic faults during ground movements]. *Truboprovodny transport – 2015: materialy X Mezhdunarodnoy uchebno-nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proc. 10th Symp. Pipeline transport – 2015]. Ufa, 2015. pp. 320–323.
3. Larionov V.I., Novikov P.A., Gumerov A.K. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya truboprovoda na uchastkakh s karstami [Analysis of Stress and Strain State of a Pipeline in Karst Areas]. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University Series Mechanical Engineering*, 2012, no. 3, pp. 60–67.
4. Honegger D.G., Nyman D.J. *Guidelines for the Seismic Design and Assessment of Natural Gas and Liquid Hydrocarbon Pipelines*. Contract PR-268–9823. Arroyo Grande, CA, Pipeline Research Council International, Inc., 2005. 206 p.
5. Bayasan R.M., Golubin S.I., Pustovoi G.P., Proshina T.V., Korotchenko A.G. Optimization of engineering solutions for thermal stabilization of saline permafrost soils at bases of structures by means of two-phase heat pipes. *Proc. 7th Minsk International Symp. Heat pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources*. Minsk, Belarus, 2008, pp. 367–370.
6. Ingebritsen S.E., Sanford W.E., Neuzil C.E. *Groundwater in geologic processes*. New York, Cambridge Univ. Press, 2006. 536 p.
7. Baker R. Variational slope stability analysis of materials with nonlinear failure criterion. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, vol. 10, bundle A. Available at: <http://www.ejge.com/2005/Ppr0514/Ppr0514.htm> (accessed 3 February 2007).
8. Carrera A. Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Mathematical Geology*, 1983, vol. 15, no. 3, pp. 403–426.
9. Kalaugher P.G., Hodgson R.L.P., Grainger P. Pre-failure strains as precursors of sliding in a coastal mudslide. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2000, vol. 33, pp. 325–334.
10. Troncone A. Numerical analysis of a landslide in soils with a strained softening behavior. *Geotechnique*, 2005, vol. 55, no. 8, pp. 585–596.
11. Burkov P.V., Klyus O.V., Shatrov A. G. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya podzemnykh truboprovodov, prolozhennykh v usloviyakh vечноy merzloty [Investigation of the stress-strain state of underground pipelines in the permafrost]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr: trudy XVIII Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh* [Problems of Geology and exploitation of mineral resources. Trudy XVIII International symposium named after academician M.A. Usov for students and young researchers]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2014. Vol. 2, pp. 565–566. Available at: <http://portal.tpu.ru/files/conferences/usovma/2014/tom2–2014.pdf> (accessed 3 February 2015).

12. Gaev A.Ya., Kilin Yu.A., Alferov I.N., Alferova N.S. Primery modelirovaniya karstovykh protsessov [Examples of modeling karst processes]. *Karstovye sistemy severa v menyayushcheyse srede*. [Proc. Symp. Northern karst systems in our changing environment]. Pinega-Golubino, Russia, 2011. pp. 34–37.
13. Chiharev V.A. Ispolzovanie geoinformatsionnykh tekhnology pri provedenii geotekhnicheskogo monitoringa truboprovodnogo transporta [Use of geoinformation technologies in geotechnical monitoring of pipeline transport]. *Truboprovodny transport. Monitoring i transport*, 2012, no. 4 (32), pp. 4–6.
14. Rasputin A.N., Zhelobetsky V.A., Kuimov S.N., Postautov K.V. Primenenie geoinformatsionnykh sistem dlya otsenki vliyaniya prirodnykh faktorov na tekhnicheskoe sostoyanie magistralnykh gazoprovodov OOO «Gazprom transgaz Ekaterinburg» [Using GIS to assess the impact of environmental factors on technical condition of main gas pipelines LLC «Gazprom transgaz Yekaterinburg»]. *Gazovaya promyshlennost*, 2009, no. 11, pp. 81–83.
15. Gosteva A.V., Glebova E.V., Chernoplekov A.N. Prognozirovaniye chrezvychaynykh situatsiy na magistralnykh gazoprovodakh na osnove rezultatov analiza riska [Forecasting emergencies at gas-main pipelines on the basis of the risk analysis results]. *Neft, gaz i biznes*, 2009, no. 9, pp. 68–70.
16. Tekhnicheskyy otchet. Vypolnenie kompleksnykh inzhenernykh izyskany po obektu «Magistralny gazoprovod «Sila Sibiri». Uchastok Chayanda–Lensk [Technical report. Implementation of complex engineering surveys on the main gas pipeline «Power of Siberia». The Chayanda–Lensk Section]. Saratov, VNIPIgazdobycha, 2012. Vol. 1–5.
17. *Prirodnye opasnosti Rossii. Ekzogennyye geologicheskie opasnosti* [Natural hazards of Russia. Exogenous geological hazards]. Moscow, Kruk Publ., 2002. Vol. 1, 345 p.
18. Zolotarev D.R., Kataev V.N. Impact of lineament tectonics on development of karst processes at local level. *GeoRisk*, 2013, no. 1, pp. 34–43. In Rus.
19. Kataev V.N., Shcherbakov S.V., Zolotarev D.S., Likhaya O.M., Kovaleva T.G. Influence of geological structure of the territory on distribution of karst forms (by the example of Kungur). *Bulletin of Perm University. Geology*, 2009, vol. 3, pp. 77–93. In Rus.
20. Shcherbakov S.V., Kataev V.N. Integralnaya otsenka karstoopasnosti urbanizirovannykh territoriy (na primere g. Kungur) [Analysis of Stress and Strain State of a Pipeline in Karst Areas]. *Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series*, 2011, vol. 153, B. 1, pp. 203–224.

Received: 18 July 2016.

Information about the authors

Lyudmila A. Strokova, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alena V. Ermolaeva, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.316.542.9

КОММУТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

Лавринович Валерий Александрович¹,
lavrhome@mail.ru

Убиенных Борис Иннокентьевич¹,
boinnu@rambler.ru.

Кладько Андрей Александрович¹,
andkladd@mail.ru

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

Актуальность работы обусловлена активно происходящим техническим перевооружением электрических сетей среднего класса напряжения на предприятиях нефтегазового комплекса Российской Федерации. Высокая эксплуатационная надежность, экологичность применения и простота обслуживания делают вакуумный выключатель наиболее предпочтительным коммутационным аппаратом для производственных условий, присущих предприятиям добывающей отрасли. Как и любое другое промышленное оборудование, вакуумный выключатель должен удовлетворять ряду характеристик, контролируемых как на этапе предэксплуатационных испытаний, так и в процессе эксплуатации. В связи с этим предварительные испытания на коммутационную способность опытных образцов вакуумных выключателей в процессе их разработки являются не только актуальной, но и необходимой задачей.

Цель работы: определение коммутационных характеристик экспериментальных вакуумных дугогасительных камер в составе высоковольтного вакуумного выключателя с номинальным напряжением 10 кВ.

Методы исследования. Для определения коммутационных характеристик исследуемого высоковольтного вакуумного выключателя была использована синтетическая схема испытаний по Вейлю–Добке, формирующая на испытуемом объекте ток короткого замыкания в диапазоне от 1 до 10 кА и переходное восстанавливающееся напряжение на контактах вакуумной камеры вплоть до 20 кВ.

Результаты. Исследована отключающая способность экспериментальных вакуумных дугогасительных камер в составе вакуумного выключателя для диапазона токов короткого замыкания 1...10 кА. Установлено, что экспериментальные вакуумные дугогасительные камеры успешно отключают ток до 18,3 кА при переходном восстанавливающемся напряжении 0,85 кВ, но при этом они непригодны для коммутации сетей с номинальным током отключения 10 кА при переходном восстанавливающемся напряжении, характерном для выключателей класса напряжения 10 кВ. Показано, что для использования исследованных экспериментальных вакуумных дугогасительных камер в сетях напряжения классом 10 кВ необходимо последовательное включение двух вакуумных дугогасительных камер в каждом из полюсов вакуумного выключателя.

Ключевые слова:

Вакуумный выключатель, коммутационные характеристики, синтетическая схема, вакуумная дугогасительная камера, испытания.

Актуальность

Высокие требования к эксплуатационной надежности, простоте и безопасности обслуживания оборудования нефтегазовых промыслов предъявляют широкий ряд условий, которым должно удовлетворять коммутационное электрооборудование [1–2]. В частности, основными требованиями к коммутационным электрическим аппаратам будут: надежность работы, высокий коммутационный ресурс, простота обслуживания, экологичность и пожаробезопасность. Всем этим требованиям удовлетворяют два типа конкурирующих между собой высоковольтных выключателей: вакуумные и элегазовые [3–6]. Как показывает практика, элегазовые выключатели не в полной мере удовлетворяют условиям работы в арктических районах, где сконцентрированы основные производственные мощности нефтегазодобывающих предприятий России, что связано с замерзанием элегаза в условиях низких

температур [7]. Оценивая перспективы дальнейшего технического перевооружения электрических сетей в районах Крайнего Севера, можно сделать предположение о том, что в ближайшие десятилетия вакуумные выключатели (ВВ) займут там доминирующее положение во всех классах напряжения.

В связи с этим становится актуальной задача экспериментального определения коммутационных параметров дугогасительных камер вакуумных выключателей как основных эксплуатационных параметров этих аппаратов [8]. На первоначальном этапе контроля параметров вакуумного выключателя коммутационные характеристики определяются в лабораторных условиях путем испытания выключателя, например, на установках по схеме Вейля–Добке [9], формирующей на испытуемой вакуумной дугогасительной камере (ВДК) ток короткого замыкания (КЗ) и переходное восстанавливающееся напряжение (ПВН).

Объект исследования

Объектом настоящего исследования явилась экспериментальная ВДК в составе вакуумного выключателя типа ВВТ-10-20, предназначенного для коммутации электрических цепей среднего класса напряжений в трехфазных сетях переменного тока промышленной частоты с изолированной нейтралью. Заявленные производителем технические характеристики выключателя сведены в табл. 1. Необходимо отметить, что сопроводительная документация на экспериментальные ВДК (рис. 1) содержала только сведения об испытательном напряжении (42 кВ) и ходе контактов (8+2 мм).

Таблица 1. Основные коммутационные характеристики выключателя ВВТ-10-20

Table 1. Principle switching characteristics of the vacuum circuit breaker VVT-10-20

Параметр Parameter	Значение Value
Номинальное напряжение, кВ Rated voltage, kV	10
Номинальный ток, А Rated current, A	630
Номинальный ток отключения, кА Rated breaking current, kA	20
Собственное время отключения, с Opening time, s	0,03
Полное время отключения, с Break time, s	0,05
Одноминутное испытательное напряжение промышленной частоты, кВ One-minute test voltage of industrial frequency, kV	42
Ресурс по коммутационной стойкости без замены ВДК при номинальном токе, циклов «Включение–Отключение» Resource for switching resistance without changing the vacuum interrupter at rated current, of «Enable–Disable» cycles	50000
Циклы «Включение–Токовая пауза–Отключение» «Enable–Current Pause–Disable» cycles	100
Количество циклов «Включение–Отключение» при номинальном токе отключения Number of «Enable–Disable» cycles at rated breaking current	100
Ход подвижного контакта, мм Movable contact movement, mm	8+2
Допустимый износ контактов, мм Permissible contact wear, mm	2
Электрическое сопротивление полюсов главной цепи, мкОм Electrical resistance of the main circuit poles, microhm	100

Одна из экспериментальных ВДК была вскрыта. Внешний вид ее узлов и деталей говорит о высоком уровне вакуумно-технологической обработки. В камере используются плоские торцевые контакты. Контактный материал, предположительно, представляет собой медь-хромовую композицию. В контактно-экранной системе присутствуют под-

ковообразные полюса 3, характерные для создания продольного магнитного поля за счёт тока отключения [10–12].

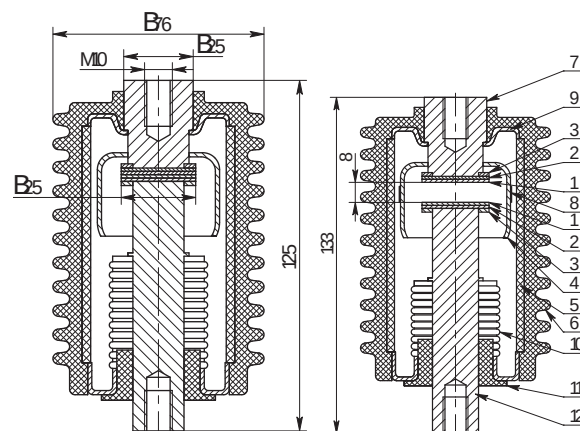


Рис. 1. Экспериментальная вакуумная дугогасительная камера: 1 – контактная площадка; 2 – подложка; 3 – полюс; 4 – ферромагнитный экран; 5 – керамический изолятор; 6 – силиконовый изолятор; 7 – неподвижный контакт; 8 – газопоглотитель; 9 – фланец; 10 – сильфон; 11 – направляющая втулка; 12 – подвижный контакт

Fig. 1. Experimental vacuum interrupter: 1 is the contact plate; 2 is the substrate; 3 is the pole; 4 is the ferromagnetic screen; 5 is the ceramic insulator; 6 is the silicone insulator; 7 is the fixed contact; 8 is the getter; 9 is the flange; 10 is the bellows; 11 is the directing plug; 12 is the movable contact

Ввиду отсутствия в технической документации на ВДК ряда ключевых параметров, решение о режимах испытания было принято на основе сопоставления геометрических размеров исследуемых ВДК, таких как диаметры подвижного и неподвижного токовыводов, габаритные размеры ВДК, с размерами ВДК, параметры которых известны [13–14]. Диаметр контактов экспериментальной ВДК – 25 мм. Торцевые контакты аналогичных размеров без продольного магнитного поля способны отключать максимальный диффузный ток дуги 10 кА. Исходя из этих соображений, были приняты следующие параметры ВДК:

- 1) рабочее напряжение – 10 кВ;
- 2) наибольшее допустимое напряжение – 12 кВ (действующее значение);
- 3) ток отключения – 10 кА (действующее значение);
- 4) номинальный ток – 630 А (действующее значение).

Особенность конструкции данной ВДК – наличие ферромагнитного экрана 4, обладающего низкими теплопроводными свойствами, гальванически связанного с неподвижным контактом 7. Эти оба фактора: низкая теплопроводность и гальваническая связь экрана с контактом ВДК, снижают отключающую способность [15].

Другая особенность конструкции – соизмеримость расстояния между разведёнными контактами с расстоянием между боковой поверхностью контакта и экраном. Такая конфигурация создаёт

условия для возникновения дуг между экраном и контактом, причем это расстояние уменьшается по мере увеличения хода контактов ВДК, а в случае колебаний подвижного контакта при отключении может стать минимальным [15].

Конструктивно выключатель состоит из трех экспериментальных ВДК (по одной в каждом из полюсов выключателя), приводного механизма и устройства управления. Внутри ВДК расположены два контакта – подвижный 12 и неподвижный 7. Во включенном состоянии выключателя пружинный механизм обеспечивает плотное поджатие контактов друг к другу. При отключении тока контакты механически раздвигаются со скоростью 1 м/с. При плавлении контактов в последней точке их касания образуются пары металла, способствующие возникновению электрической дуги, которая горит до тех пор, пока ток в цепи не перейдет через ноль [16–19].

Из расплавленного металла вытягивается тонкий проводник, электрически связывающий контакты. Вследствие локального перегрева проводника, при протекании по нему тока огромной плотности, он взрывается, заполняя пространство между контактами микрокаплями металла, создающими среду, через которую и происходит замыкание тока, при этом напряжение между контактами составляет лишь несколько процентов от номинальной величины напряжения выключателя [16].

После погасания дуги между контактами восстанавливается высокое напряжение, при этом остаточный ток в выключателе отсутствует, что дает возможность применять для испытания отключающей способности выключателя два источника питания, синхронизированных между собой: источник большого тока малого напряжения и источник высокого напряжения малого тока. Это обстоятельство положено в основу реализации синтетических испытаний [9].

Описание установки

Для проведения синтетических испытаний в Энергетическом институте Томского политехнического университета создан испытательный стенд, реализующий схему Вейля–Добке (рис. 2), включающую в себя два синхронизированных электрических контура [20]. Первый – силовоточный контур генератора импульсных токов (ГИТ), в котором создается ток КЗ, второй – высоковольтный контур генератора импульсных напряжений (ГИН), в котором формируется ПВН. Параметры контуров ГИН и ГИТ сведены в табл. 2.

Исходное состояние схемы: конденсаторные батареи $C_{\text{гит}}$, $C_{\text{гин}}$ – заряжены; контакты ВДК 1 – разомкнуты; ВДК 2, 3 – замкнуты.

Для начала испытаний необходимо подать команду на замыкание контактов коммутационной ВДК 1. После их замыкания происходит разряд батареи $C_{\text{гит}}$ и через испытуемую ВДК 3 начинает протекать ток промышленной частоты I_2 . По исте-

чении 0,5 миллисекунд контакты испытуемой ВДК 3 размыкаются, инициируя электрический разряд в межконтактном промежутке. Синхронно с контактами испытуемой ВДК 3 размыкаются контакты защитной ВДК 2, между которыми также возникает электрический разряд.

Таблица 2. Технические характеристики стенда синтетических испытаний

Table 2. Specification of synthetic test facility

Параметр Parameter	Значение Value
Напряжение питания, В Supply voltage, V	220/380
Максимальная потребляемая мощность, кВт Maximum power consumption, kW	6
Максимальное используемое статическое напряжение, кВ Maximum static voltage used, kV	35
Емкость конденсаторной батареи ГИТ, мФ Capacity of the capacitor bank of the pulse currents generator (PCG), mF	75
Максимальное зарядное напряжение конденсаторной батареи ГИТ, кВ Maximum charge voltage of the capacitor bank of the PCG, kV	3
Максимальный импульсный ток ГИТ, кА PCG maximum pulse current, kA	50
Длительность импульса ГИТ, мс PCG pulse duration, ms	10
Емкость конденсаторной батареи ГИН, мкФ Capacity of the capacitor bank of the pulse voltage generator (PVG), mF	12–48
Максимальное зарядное напряжение конденсаторной батареи ГИН, кВ Maximum charge voltage of the capacitor bank of the PVG, kV	35
Максимальный импульсный ток ГИН, кА PVG maximum pulse current, kA	5
Длительность импульса ГИН, мс PVG pulse duration, ms	1
Максимальное импульсное напряжение ГИН, кВ PCG maximum pulse voltage, kV	41
Максимальное рабочее давление воздуха/азота в пневмосистеме, атм Maximum operating pressure of air/nitrogen in the pneumatic system, atm	5
Напряжение питания магниторазрядного насоса, кВ Supply voltage of magnetic-discharge pump, kV	7
Максимальный ток магниторазрядного насоса, А Maximum current of magnetic-discharge pump, A	0,5
Требуемый уровень давления остаточных газов, Торр Required level of residual gas pressure, torr	$\leq 10^{-6}$

Примерно за полмиллисекунды до прохождения тока I_2 через нулевое значение от системы управления испытательным стендом подается команда на срабатывание воздушного разрядника F . При его срабатывании происходит разряд батареи $C_{\text{гин}}$ на испытуемую ВДК 3. Возникающий при этом ток I_1 частотой 500 Гц суммируется с током I_2 .

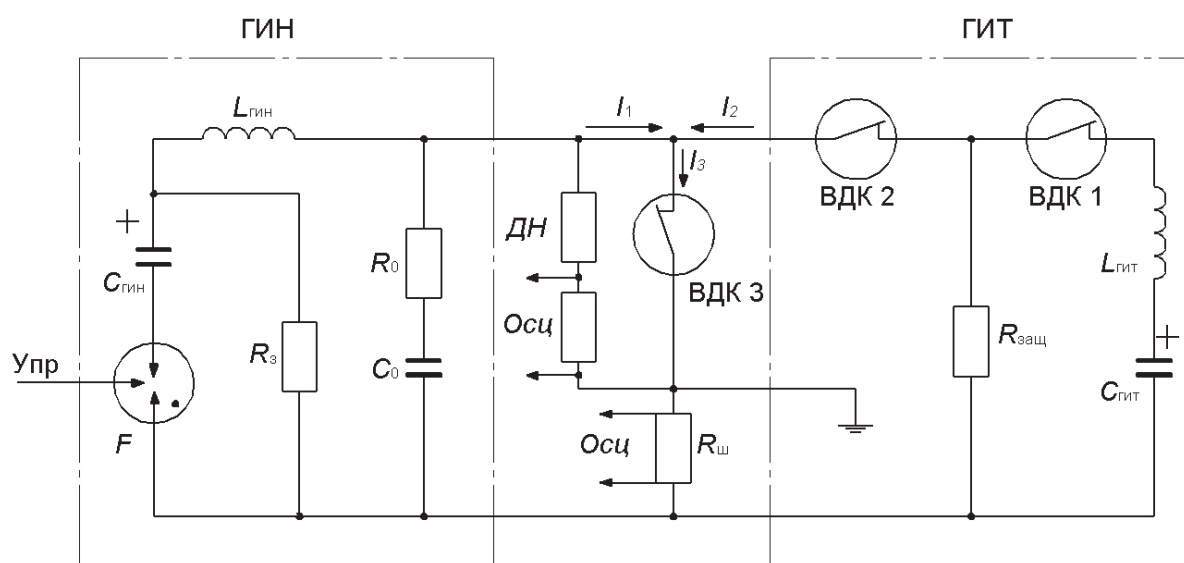


Рис. 2. Принципиальная схема испытательного стенда: $C_{\text{ГИН}}$ и $C_{\text{ГИТ}}$ – конденсаторные батареи; $L_{\text{ГИН}}$ и $L_{\text{ГИТ}}$ – индуктивности контуров; ВДК 1 – коммутационная ВДК; ВДК 2 – защитная ВДК; ВДК 3 – испытуемая ВДК; R_0 и C_0 – резистивный и емкостный элементы схемы формирования ПВН; R_3 – зарядный резистор; F – воздушный высоковольтный управляемый разрядник; I_1 – ток ГИН; I_2 – ток ГИТ; I_3 – ток в испытуемой ВДК; ДН – резистивный делитель напряжения; $R_{\text{защ}}$ – защитный резистор; $R_{\text{ш}}$ – сопротивление токового шунта

Fig. 2. Schematic diagram of the synthetic test facility: $C_{\text{ГИН}}$ and $C_{\text{ГИТ}}$ are the capacitor banks; $L_{\text{ГИН}}$ and $L_{\text{ГИТ}}$ are the inductances of loops; ВДК 1 is the switching vacuum interrupter; ВДК 2 is the protective vacuum interrupter; ВДК 3 is the test vacuum interrupter; R_0 and C_0 are the resistive and capacitive elements of the transient recovery voltage forming circuit; R_3 is the charging resistor; F is the air-driven high-voltage arrester; I_1 is the PVG current; I_2 is the PCG current; I_3 is the current in the test vacuum interrupter; ДН is the resistive voltage divider; $R_{\text{защ}}$ is the protective resistor; $R_{\text{ш}}$ is the resistance of current shunt

С этого момента через контакты ВДК 3 протекает суммарный ток I_3 , а в электрической дуге защитной ВДК 2 протекает ток, равный разности токов I_2 и I_1 . При уравнивании этих токов происходит гашение дуги и восстановление электрической прочности защитной ВДК 2, тем самым осуществляется гарантированное отключение силовоточного контура ГИТ от испытуемой ВДК 3. Поскольку отключение защитной ВДК 2 происходит раньше перехода тока в испытуемой ВДК 3 через ноль, то, начиная с этого момента и до перехода тока через ноль, через испытуемую ВДК 3 протекает только ток I_1 и все дальнейшие процессы в ней определяются параметрами высоковольтного контура ГИН.

Если скорость восстановления электрической прочности выше, чем скорость ПВН, то наступает следующий этап процесса коммутации – на контактах ВДК 3 появляется возвращающееся напряжение. Если после 0,3 с в ВДК 3 не произошло повторного зажигания дуги, то можно говорить о том, что произошло успешное отключение тока короткого замыкания.

В противном случае происходит повторное зажигание дуги (отказ) [8]. Отказ может произойти как на стадии ПВН, так и на стадии возвращающегося напряжения. В этом случае в течение полупериода в цепи разряда ГИН в противоположном направлении потечёт ток с частотой 500 Гц. В момент очередного перехода тока через ноль происхо-

дит восстановление напряжения на контактах ВДК 3, при этом напряжение имеет противоположную полярность и меньшую амплитуду. Подобные процессы будут повторяться до того момента, пока не восстановится электрическая прочность ВДК 3.

Методика испытаний

На первом этапе испытаний использовался только силовоточный контур ГИТ. Испытанию подверглась ВДК фазы А. Значение напряжения на контактах испытуемой ВДК 3 после гашения дуги определялось собственным ПВН разрядной цепи $U_{\text{ПВН}}$ и остаточным послеразрядным напряжением на конденсаторной батарее. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Во всём диапазоне токов гашение дуги происходит в первый полупериод тока (критерий успешного отключения) [20]. Напряжение дуги для 8 из 10 экспериментов варьируется от 30,4 до 34 В для токов в диапазоне 10,1–18,3 кА, т. е. слабо зависит от тока дуги. Анализ форм кривых U_d , говорит об отсутствии анодного пятна, возникновение которого создает высокую вероятности отказа ВДК. ВДК фаз В и С также успешно прошли этот этап испытаний. Исходя из этих предпосылок можно ожидать, что испытуемые ВДК способны отключать токи амплитудой 18,3 кА, что соответствует номинальному отключаемому току 10 кА [21].

Таблица 3. Результаты испытаний ВДК фазы А

Table 3. Results of testing the vacuum interrupter phase A

$U_{згит}, \text{кВ}$	$I_{ргит}, \text{кА}$	$U_d, \text{В}$	$\Delta t_d, \text{мс}$	$t, \text{мс}$	$U_{пвн}, \text{кВ}$	Результат/Result
0,45	9,4	28	5,1	9,7	0,5	успешное отключение successful breaking
0,50	10,1	33	7,0			
0,55	11,2	34	7,1			
0,60	12,5	34	6,5			
0,65	14,4	32	7,1			
0,70	14,6	34	6,1			
0,75	15,8	30	5,9			
0,80	16,9	33	5,2			
0,85	18,3	34	6,0			

Примечание: $U_{згит}$ – напряжение заряда конденсаторной батареи ГИТ; $I_{ргит}$ – амплитудное значение тока в цепи разряда ГИТ; U_d – напряжение вакуумной дуги; Δt_d – длительность горения вакуумной дуги; t – длительность полуволны тока разряда; $U_{пвн}$ – переходное восстанавливающее напряжение.

Note: $U_{згит}$ is the charge voltage of PCG capacitor bank; $I_{ргит}$ is the PCG current; U_d is the voltage of vacuum arc; Δt_d is the lifetime of vacuum arc; t is the duration of the half-wave discharge current; $U_{пвн}$ is the transient recovery voltage.

На втором этапе испытаний к силовоточному контуру ГИТ был добавлен высоковольтный контур ГИН, т. е. была в полной мере реализована схема синтетических испытаний [9]. Результаты второго этапа испытаний приведены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты испытаний ВВ

Table 4. Results of testing the vacuum interrupter

$U_{згит}, \text{кВ}$	$U_{згин}, \text{кВ}$	$I_{ргит}, \text{кА}$	$U_{пвн}, \text{кВ}$	Полупериод отключения Half the period of disconnecting	Результат Result
Испытание ВДК фазы А/Testing the vacuum interrupter phase A					
0,41	10	7,5	10	второй second	нет отклю- чения failure
0,70	13	13,2	17		
0,73	14	15,2	15		
0,74	13	15,9	10		
0,75	14	15,4	12	четвертый/fourth	
Испытание ВДК фазы В/Testing the vacuum interrupter phase B					
0,51	13	11,5	16	второй second	нет отклю- чения failure
0,54		11,5	17		
0,55		12,3	15		
0,73		16,0	14		
0,74	14	16,0	13		
Испытание ВДК фазы С/Testing the vacuum interrupter phase C					
0,28	13	5,3	8	четвертый/fourth	нет отклю- чения failure
0,53	11	7,8	12	второй second	
0,72	13	16,0	15		
0,74	14	15,6	13		
0,75		16,2	14		

Примечание: $U_{згин}$ – напряжение заряда конденсаторной батареи ГИН.

Note: $U_{згин}$ is the charge voltage of PVG capacitor bank.

Отсутствие успешных отключений для ВДК всех фаз ВВ указывает на ошибочность первоначальной оценки номинальных параметров испытуемых камер.

На отключающую способность ВДК влияет совокупность таких параметров, как напряжение, ток, габариты ВДК, расстояние между контактами ВДК при отключении, «вылет» контактов, скорость разведения контактов, материал контактов, качество вакуумно-термической обработки [8, 15]. Из всех перечисленных параметров наиболее доступными для оперативного регулирования в ходе испытаний являются величины коммутируемых токов и напряжений.

Во время синтетических испытаний ГИН и ГИТ являлись униполярными источниками питания. Подвижный и неподвижный контакты ВДК на протяжении всего периода испытаний имеют неизменную полярность. Как известно, дуговая эрозия анода и катода в дуговом разряде неодинакова, что может при длительных испытаниях создать несимметричные изменения контактно-экранной системы ВДК, в свою очередь ведущие к несимметричным условиям горения и гашения вакуумного разряда. И наоборот, если ВДК имеет несимметричную внутреннюю конструкцию, то условия гашения и инициирования электрического пробоя на аноде и катоде неодинаковы. Исходя из этих соображений, на третьем этапе испытаний был проведен эксперимент по определению отключающей способности ВДК при смене полярности (табл. 5) контактов фазы А.

Таблица 5. Результаты испытаний ВДК фазы А ВВ при смене полярности контактов

Table 5. Results of testing the vacuum interrupter phase A with contacts changing

$U_{згит}, \text{кВ}$	$U_{згин}, \text{кВ}$	$I_r, \text{кА}$	$U_{пвн}, \text{кВ}$	Результат/Result
0,71	15	13,8	11,0	нет отключения failure
0,71	15	14,2	12,1	
0,72	14	15,1	11,7	
0,72	14	15,1	15,0	
0,72	14	14,7	11,7	успешное отключение successful breaking

Как видно из табл. 5, смена полярности не позволила существенно изменить сложившуюся тенденцию, обеспечив лишь одно успешное срабатывание в пяти проведенных экспериментах.

Анализ осциллограмм второго этапа испытаний позволил сделать вывод о том, что в большинстве опытов ВДК не отключают токи короткого замыкания при наложении ПВН, но отключают токи ПВН на втором и третьем полупериоде. В моменты отключения после отказов величина ПВН варьируется в диапазоне 9–13 кВ. При последовательном соединении ВДК такой уровень ПВН можно прикладывать, не меняя номинальный ток отключения и не перестраивая ГИН.

Схема эксперимента при последовательном соединении двух ВДК, реализованная на четвертом этапе испытаний, представлена на рис. 3. ВДК 3, 5 испытуемого выключателя ИВ соединены после-

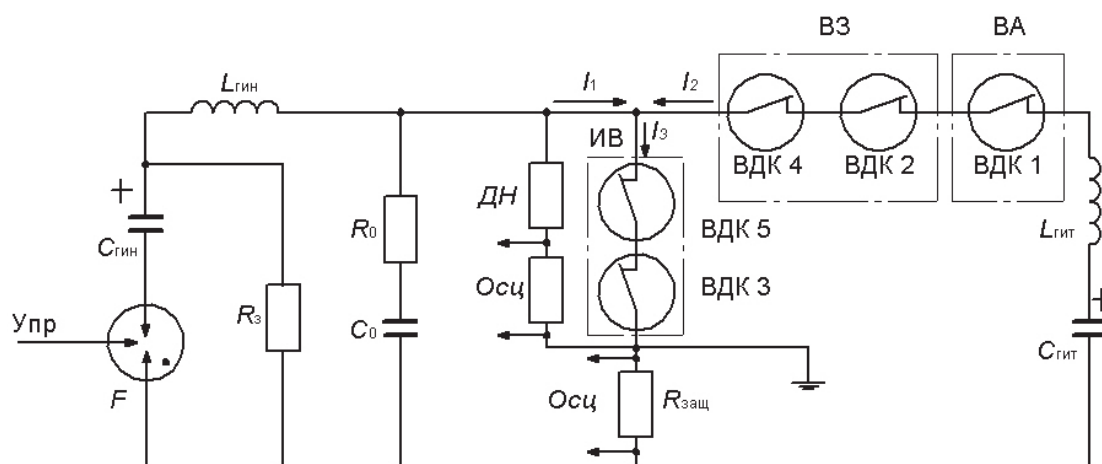


Рис. 3. Схема соединений элементов при испытании двух последовательно соединённых ВДК

Fig. 3. Circuit of the elements connection when testing two series-connected vacuum interrupters

довательно. В качестве коммутирующего элемента ВА использована ВДК 1 синхронного выключателя. В качестве защитного выключателя ВЗ используются две последовательно соединённые камеры: ВДК 2 испытуемого выключателя и ВДК 4 синхронного выключателя. Как показали испытания (табл. 6), эта схема позволяет достичь успешного отключения токов КЗ величиной 16 кА в первый полупериод тока, что соответствует номинальному напряжению ВВ класса 10 кВ [21].

Таблица 6. Результаты испытаний двух последовательно соединённых ВДК ВВ

Table 6. Results of testing two series-connected vacuum interrupters

$U_{згит}, \text{кВ}$	$U_{зпит}, \text{кВ}$	$I_p, \text{кА}$	$U_{пвн}, \text{кВ}$	Результат/Result
0,73	13	16,0	11,8	успешное отключение successful breaking
0,73	14	16,0	13,3	
0,73	15	16,0	12,0	
0,73	15	15,5	15,0	
0,74	14	14,0	13,0	

После завершения исследований по отключению номинальных токов были проведены эксперименты по отключению токов в диапазоне 3–5 кА при амплитуде напряжения ПВН 20 кВ и скорости восстановления напряжения 0,17 кВ/мкс. Исследовались ВДК всех трёх фаз. В общей сложности проведено 20 испытаний. Успешных отключений не зафиксировано.

Результаты испытаний

После завершения испытаний, вакуумный выключатель типа ВВТ-10–20 находится в рабочем состоянии. Видимых повреждений нет. Все электроизоляционные и электромеханические характеристики в норме. Исключение составляет ВДК фазы А, переходное сопротивление контактов которой резко отличается от переходных сопротивле-

ний прочих фаз (переходное сопротивление контактов фазы А – 257 мкОм, фаз В и С – 63 и 67 мкОм соответственно). Предположительная причина – повышенный износ контактов ВДК, вследствие большего, по сравнению с другими фазами, числа предварительных испытаний на высоких токах отключения, и ослабление силы поджатия контактов. Кроме того, ВДК фазы А эпизодически использовалась в качестве защитной ВДК. Для окончательного выявления обозначенной причины планируется дополнительная ревизия ВВТ-10–20.

После вскрытия одной из прошедших испытаний камер, было установлено, что эрозии подверглась лишь часть поверхности контактов ВДК. Без проведения дополнительных исследований не представляется возможным выяснить причину этого явления, но уже сейчас можно выдвинуть предположение о том, что конфигурация магнитного поля, создаваемого в исследованных ВДК способствует переходу электрической дуги в контрагированное состояние, что крайне неблагоприятно отражается на коммутационном ресурсе ВДК. Основываясь на данных, полученных в ходе испытаний, можно дать некоторые рекомендации, способные обеспечить наиболее оптимальный режим работы ВДК в опытах отключения, а именно:

- 1) уменьшить ход контактов до минимально допустимого;
- 2) снизить «вылет» контактов ВДК при отключении за счет дополнительной регулировки буфера отключения;
- 3) максимально увеличить скорость контактов ВДК при отключении.

Заключение

Синтетические испытания показали, что исследованные экспериментальные ВДК в составе вакуумного выключателя типа ВВТ-10–20 успешно отключают ток до 18,3 кА при ПВН 0,85 кВ (табл. 3). Изначальное предположение о том, что

испытываемый ВВ, содержащий по одной экспериментальной ВДК в каждом из своих полюсов, способен к работе в сетях напряжения классом 10 кВ, оказалось неверным. Количество отказов в коммутации для дугогасительных камер всех фаз ВВ (табл. 5) свидетельствует о том, что конструкция

контактно-экранной системы испытываемой ВДК не обеспечивает отключения номинальных токов 10 кА. Показано, что последовательное включение двух ВДК в каждом из полюсов ВВ позволяет отключать токи 10 кА при ПВН, характерном для выключателей класса напряжения 10 кВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение предприятий добычи и переработки нефти и газа. – М.: Форум, 2014. – 352 с.
2. Сибикин Ю.Д. Электрооборудование нефтяной и газовой промышленности. Оборудование систем электроснабжения. – М.: ИП РадиоСофт, 2015. – 352 с.
3. Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems / R. Smeets, L. van der Sluis, M. Kapetanovic, D. Peelo, A. Janssen. – New York: John Wiley & Sons, 2014. – 440 p.
4. Набатов К.А., Афонин В.В. Высоковольтные вакуумные выключатели распределительных устройств. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2010. – 96 с.
5. Афонин В.В., Набатов К.А. Элегазовые выключатели распределительных устройств высокого напряжения. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2009. – 96 с.
6. Garzon D.R. High Voltage Circuit Breakers: Design and Applications. – New York, Basel: Marcel Dekker, Inc, 2002. – 425 p.
7. Дьяков А.В. Элегазовые выключатели не выдержали низких температур // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2011. – № 2. – С. 25–29.
8. Slade P. The Vacuum Interrupter: Theory, Design, and Application. – Boca Raton: CRC Press, 2008. – 510 p.
9. Каплан В.В., Нашатырь В.М. Синтетические испытания высоковольтных выключателей. – Л.: Энергия, 1980. – 200 с.
10. Arc Behaviors in Vacuum Interrupters with Axial Magnetic Fields Electrodes / W. Zhongyi, Z. Yuesheng, L. Zhiyuan, C. Shaoyong // Plasma science and technology. – 2007. – V. 5. – № 5. – P. 570–574.
11. Agarwal M.S., Goswami P.K. Study of High-current Vacuum Arcs in Axial Magnetic Fields // International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). – Mumbai, 2014. – P. 157–160.
12. Забелло К.К. Исследование влияния магнитных полей различной ориентации на характеристики катодного пятна вакуумной дуги и генерируемой пятном плазменной струи: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – СПб., 2015. – 128 с.
13. Greenwood A. Vacuum switchgear. – London: IEE Press, 1994. – 253 p.
14. Перцев А.А., Рыльская Л.А. Вакуумные дугогасительные камеры // Сборник статей сотрудников ВЭИ. – Рязань: Рязанский издательский дом, 2008. – С. 148–165.
15. Slade P. Electrical Contacts: Principles and Applications. Second Edition. – Boca Raton: CRC Press, 2013. – 1237 p.
16. Lafferty J. Vacuum Arcs: Theory and Application. – New York: John Wiley & Sons, 1980. – 378 p.
17. Schade E. Physics of High-Current Interruption of Vacuum // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2005. – V. 33. – № 5. – P. 1564–1575.
18. Tsukima M., Abe J., Koga H. Temperature Analysis on Contact Surface after High-Current Diffuse Vacuum Arc // International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). – Mumbai, 2014. – V. 134. – № 11. – P. 930–935.
19. High-Current Vacuum Arc Shunted by a Semiconductor Switch on Kiloampere Current Interruption / A.V. Schneider, S.A. Popov, A.V. Batrakov, V.A. Lavrinovich // IEEE Transaction on Plasma Science. – 2016. – V. 44. – № 7. – P. 1235–1240.
20. Лавринович В.А., Лопатин В.В., Перепелкин С.Н. Синтетические испытания вакуумных выключателей // Промышленная энергетика. – 2005. – № 2. – С. 19–22.
21. ГОСТ Р 52565–2006. Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. Общие технические условия. – М.: ИПК «Издательство стандартов», 2007. – 91 с.

Поступила 06.09.2016 г.

Информация об авторах

Лавринович В.А., доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетических систем Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Убиенных Б.И., кандидат технических наук, консультант кафедры электроэнергетических систем Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кладько А.А., аспирант кафедры высоковольтной электрофизики и сильноточной электроники Института физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.316.542.9

SWITCHING TESTS OF AN EXPERIMENTAL VACUUM CIRCUIT BREAKER

Valeriy A. Lavrinovich¹,
lavrhome@mail.ru

Boris I. Ubiennykh¹,
boinnu@rambler.ru.

Andrey A. Kladko¹,
lavrhome@mail.ru

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

Relevance of the work is caused by the active ongoing technical re-equipment of electric networks medium voltage at oil and gas enterprises of the Russian Federation. High operational reliability, environmental friendliness and ease of maintenance make the vacuum circuit breaker the most preferred switchgear for industrial conditions inherent in the mining industry enterprises. Like any other industrial equipment, the vacuum circuit breaker must meet certain characteristics, controlled both during the pre-operational testing and at operation. In this regard, the preliminary tests on the prototypes of the switching capacity of the vacuum switches during their design are not only relevant but necessary task.

The main aim of the study is the experimental determination of the switching characteristics of the vacuum interrupters as a part of the high-voltage vacuum circuit breaker with a rated voltage of 10 kV.

The methods. To determine the switching characteristics of the investigated high-voltage vacuum circuit breaker the authors have applied the synthetic test circuit by Vale–Dobker, forming on the test object the fault current in the range from 1 to 10 kA and transient recovery voltage across the contacts of the vacuum chamber up to 20 kV.

The results. The authors studied the breaking capacity of the experimental vacuum interrupters as a part of the vacuum circuit breaker for fault current range of 1...10 kA. It was determined that the experimental vacuum interrupters successfully switch off the current to 18,3 kA at transitional recovery voltage of 0,85 kV, but they are not suitable for switching networks with rated breaking current of 10 kA at transitional recovery voltage characteristic of the voltage class switches of 10 kV. It is shown that series connection of two vacuum interrupters in each pole of the vacuum circuit breaker is necessary for applying the experimental vacuum interrupters in the networks of 10 kV voltage class.

Key words:

Vacuum circuit breaker, switching characteristics, synthetic scheme, vacuum interrupter, tests.

REFERENCES

1. Sibikin Yu.D. *Elektrosnabzhenie predpriyatiy dobychi i pererabotki nefiti i gaza* [Power supply of oil and gas mining and processing enterprises]. Moscow, Forum Publ., 2014. 352 p.
2. Sibikin Yu.D. *Elektrooborydovanie neftyanoy i gazovoy promyshlennosti. Oborudovanie sistem elektrosnabzheniya* [Electrical equipment of oil and gas industry. Power systems equipment]. Moscow, IP RadioSoft Publ., 2015. 352 p.
3. Smeets R. *Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems*. New York, John Wiley & Sons Publ., 2014. 440 p.
4. Nabatov K.A., Afonin V.V. *Vysokovoltnye vyklyuchateli raspredelitelnykh ustroystv* [High-voltage vacuum circuit breakers of switchgear]. Tambov, TGTU Publ., 2010. 96 p.
5. Afonin V.V., Nabatov K.A. *Elegazovye vyklyuchateli raspredelitelnykh ustroystv vysokogo naprayzheniya* [Gas-insulated circuit breakers of high-voltage distribution devices]. Tambov, TGTU Publ., 2009. 96 p.
6. Garzon D.R. *High Voltage Circuit Breakers: Design and Applications*. New York, Basel, Marcel Dekker, Inc Publ., 2002. 425 p.
7. Dyakov A.V. Elegazovye vyklyuchateli ne vyderzhali nizkikh temperature [SF 6 circuit-breakers did not undergo high temperatures]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2011, no. 2, pp. 25–29.
8. Slade P. *The Vacuum Interrupter: Theory, Design, and Application*. Boca Raton, CRC Press Publ., 2008. 510 p.
9. Kaplan V.V., Nashatyr V.M. *Sinteticheskie ispytaniya vysokovoltnykh vyklyuchateley* [Synthetic testing of high-voltage circuit breakers]. Leningrad, Energiya Publ., 1980. 200 p.
10. Zhongyi W., Yuesheng Z., Zhiyuan L., Shaoyong C. Arc Behaviors in Vacuum Interrupters with Axial Magnetic Fields Electrodes. *Plasma science and technology*, 2007, vol. 5, no. 5, pp. 570–574.
11. Agarwal M.S., Goswami P.K. Study of High-Current Vacuum Arcs in Axial Magnetic Fields. *International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)*. Mumbai, 2014. pp. 157–160.
12. Zabello K.K. *Issledovanie vliyaniya magnitnykh poley razlichnoy orientatsii na kharakteristiki katodnogo pyatna vakuumnoy dugi i generiruyemoy pyatnom plazmennoy strui. Dis. Kand. nauk* [Investigation of influence of magnetic fields of different orientation on characteristics of a cathode spot of a vacuum arc and spot-generated plasma jet]. Saint Petersburg, 2015. 128 p.
13. Greenwood A. *Vacuum switchgear*. London, IEE Press Publ., 1994. 253 p.
14. Pertsev A.A. *Vakuumnye dugogasilnye kamery* [Vacuum interrupters]. *Sbornik statey sotrudnikov VEI* [Collection of articles of the VEI employees]. Ryazan, Ryazan Publ. house, 2008, pp. 148–165.
15. Slade P. *Electrical Contacts: Principles and Applications*. Second Edition. Boca Raton, CRC Press Publ., 2013. 1237 p.
16. Lafferty J. *Vacuum Arcs: Theory and Application*. New York, John Wiley & Sons Publ., 1980. 378 p.
17. Schade E. Physics of High-Current Interruption of Vacuum. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, vol. 33, no. 5, pp. 1564–1575.
18. Tsukima M., Abe J., Koga H. Temperature Analysis on Contact Surface after High-Current Diffuse Vacuum Arc. *International*

- Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)*. Mumbai, 2014. Vol. 134, no. 11, pp. 930–935.
19. Schneider A.V., Popov S.A., Batrakov A.V., Lavrinovich V.A. High-Current Vacuum Arc Shunted by a Semiconductor Switch on Kiloampere Current Interruption. *IEEE Transaction on Plasma Science*, 2016, vol. 44, no. 7, pp. 1235–1240.
20. Lavrinovich V.A., Lopatin V.V., Perepelkin S.N. Sinteticheskie ispytaniya vakuumnykh vyklyuchateley [Synthetic Tests of Vacuum Circuit Breakers]. *Promyshlennaya energetika*, 2005, no. 2, pp. 19–22.
21. GOST R 52565–2006. Vyklyuchateli peremennogo toka na napryazheniya ot 3 do 750 kV. Obshchie tekhnicheskie usloviya [State Standard R 52565–2006. AC switches for voltages from 3 to 750 kV. General specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 91 p.

Received: 6 September 2016.

Information about the authors

Valeriy A. Lavrinovich, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Boris I. Ubiennykh, Cand. Sc., counselor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Andrey A. Kladko, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 553.98.061.12/17

КОЛЛЕКТОРЫ И ФЛЮИДОУПОРЫ В ОТЛОЖЕНИЯХ ВЕНДА И КЕМБРИЯ ПРЕДЪЕНИСЕЙСКОЙ СУБПРОВИНЦИИ

Тумашов Игорь Викторович¹,

TumashovIV@ipgg.nsc.ru

Вараксина Ирина Валерьевна¹,

VaraksinaIV@ipgg.nsc.ru

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

Актуальность исследования. На территории Предъенисейской нефтегазоносной субпровинции на основании обобщения актуальной геолого-геофизической информации и проведенных детальных литологических исследований кернового материала скважин Аверинская-150, Вездеходная-3, 4, Восток-1, 3, 4 и Лемок-1, пробуренных в южной части осадочного бассейна, впервые выделены и охарактеризованы пять наиболее перспективных на обнаружение нефти и газа комплексов пород-коллекторов и флюидоупоров в венд-кембрийской части разреза.

Целью работы является научное обоснование направлений поиска залежей углеводородов в отложениях венда и кембрия на территории Предъенисейской нефтегазоносной субпровинции.

Методы исследований: детальное описание кернового материала скважин, петрографическое изучение пород, генетический анализ различных типов отложений и выяснение условий их седиментации, анализ результатов ГИС, палеонтологических исследований, временных сейсмических разрезов, изучение пустотного пространства пород в керне и шлифах, анализ результатов опробования скважин и фильтрационно-емкостных свойств, установление взаимосвязи между литологическими особенностями пород и их коллекторскими свойствами.

Результаты исследований. На основании проведенного исследования выяснено, что среди отложений, участвующих в строении венд-кембрийской части разреза, наилучшими фильтрационно-емкостными свойствами обладают биоморфные и зернистые типы карбонатных пород. Выявленные особенности постседиментационных преобразований пород и проведенная оценка их влияния на формирование коллекторских свойств позволили установить развитие каверново-порового и каверново-порово-трещинного типов коллекторов в вендских отложениях, и коллекторов порового, порово-каверново-трещинного и трещинно-порового типов в кембрийских отложениях. В изученном разрезе выделены пять комплексов пород-коллекторов и флюидоупоров наиболее перспективных на обнаружение нефти и газа. Литологическая и фациальная выдержанность разреза позволяет считать, что установленные потенциально нефтегазоносные венд-кембрийские отложения имеют широкое распространение на всей территории исследования.

Ключевые слова:

Предъенисейская нефтегазоносная субпровинция, резервуары, коллекторы, флюидоупоры, венд-кембрийские отложения.

Введение

История геологического изучения левобережья Енисея берет начало с 30-х годов XX века [1]. Плановое исследование палеозоя этой территории приходится на 1960–1970-е гг. В этот период большой вклад в изучение нефтегазоносности доюрского комплекса восточной окраины Западно-Сибирской плиты (ЗСП) внесли работы К.В. Боголепова, О.И. Богуш, В.С. Бочкарева, А.А. Булынниковой, В.С. Вышемирского, В.И. Драгунова, О.Г. Жеро, Н.П. Запивалова, А.Э. Конторовича, Л.В. Мирошникова, Н.Н. Ростовцева, А.Л. Смирнова, В.С. Суркова, А.А. Трофимука и др. [2–5]. В последующие годы (1980–1990 гг.) в юго-восточной части ЗСП были пробурены глубокие скважины: Аверинская-150, Вездеходная-4, Лемок-1, Тыйская-1, и выполнен большой объем сейсмических работ МОГТ. Полученные данные позволили исследователям подтвердить вывод о распространении мощных слабодислоцированных верхнепротерозойско-палеозойских отложений платформенного типа под мезозойским осадочным чехлом и выделить новый, Предъенисейский, осадочный бассейн [6–9]. Уникальная геологическая информа-

ция о рассматриваемом регионе была получена в период 2005–2008 гг. благодаря выполненным, согласно региональной программе геолого-разведочных работ (ГРР), сейсмическим работам и пробуренным параметрическим скважинам Восток-1, 3, 4 на востоке Томской области и юго-западе Красноярского края (рис. 1). В результате этих работ исследователям удалось уточнить геологическую модель региона, выделить ряд перспективных нефтегазоносных комплексов, провести начальную оценку углеводородного потенциала новой Предъенисейской субпровинции [10–14].

Однако, ввиду сложного геологического строения и неравномерной изученности рассматриваемой территории, многие вопросы, связанные с детальным исследованием вскрытых отложений, условиями их осадконакопления, а также характером влияния седиментационных и постседиментационных процессов на формирование коллекторских свойств пород, остаются недостаточно разработанными. В статье на основании обобщения актуальной геолого-геофизической информации и детальных литологических исследований кернового материала, пробуренных скважин Аверин-

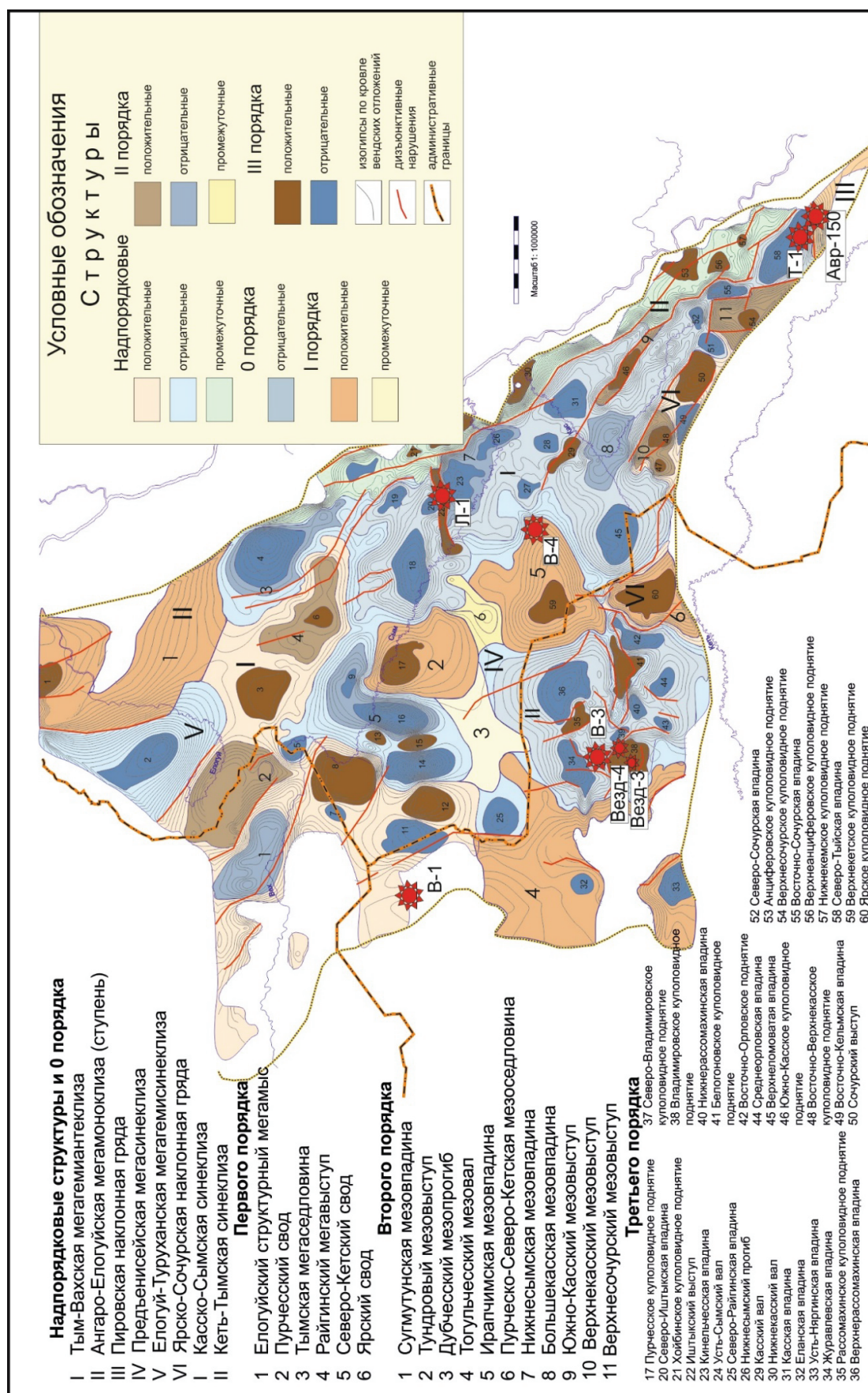


Рис. 2. Карта тектонического районирования по кровле вендских отложений (отражающий горизонт K_V) [16]

Fig. 2. Map of tectonic zoning by the roof of the Vendian deposits (reflecting horizon KV) [16]

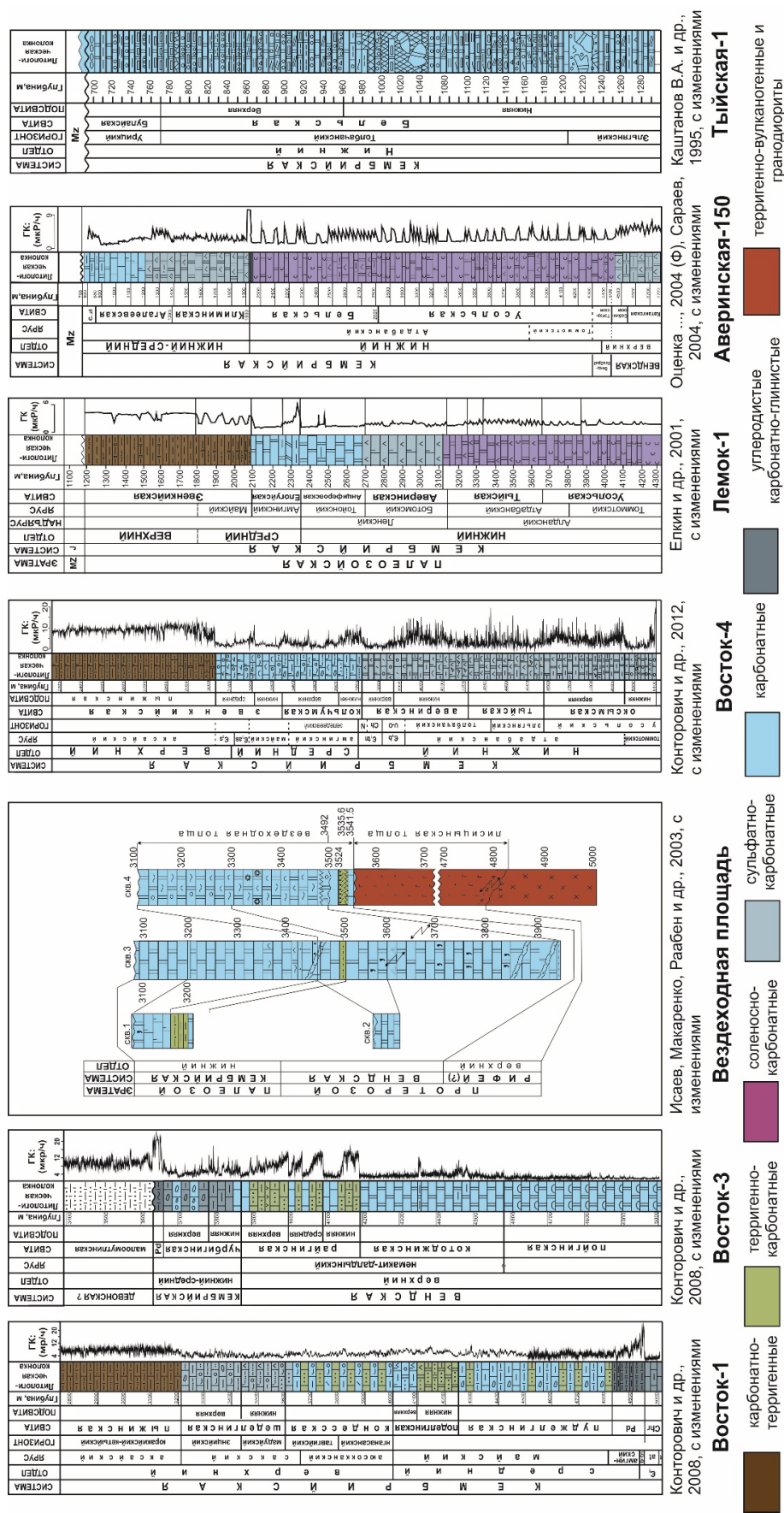


Рис. 4. Структура и состав отложений венды и кембрия предьенсейской части Западно-Сибирской геосинеклизы [16]
Fig. 4. Structure and composition of sediments of the Vendian-Cambrian section of the Predyensey oil-and-gas area [16]

и в вещественном плане. В его составе преимущественно развиты карбонатные (доломитовые и доломитово-известковые) породы. Терригенные, терригенно-карбонатные и терригенно-эвапоритовые отложения распространены в меньшей степени (рис. 4).

Фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) пород-коллекторов во многом обусловлены структурно-генетическими особенностями отложений, их вещественным составом и постседиментационными изменениями. Однако определенные в лабораторных условиях значения по суммарной пористости, проницаемости и отчасти по трещинной емкости характеризуют только плотную часть породы – матрицу. Более достоверные выводы о развитии коллекторских свойств в отложениях осуществляются на основании комплексных исследований (макроописание керна, результаты интерпретации комплекса ГИС (ГК+АК+КВ), а также косвенной информации (низкий выход керна, интенсивное поглощение промывочной жидкости, показания упругих волн в таких участках разреза, расхождение коэффициентов пористости, рассчитанных разными методами по ГИС и керну, и т. д.).

С учетом этих данных в разрезах рассматриваемых скважин были выявлены проницаемые и непроницаемые комплексы (потенциальные коллекторы и флюидоупоры), а также, на основании опубликованных рекомендаций К.И. Багринцевой [35], проведена типизация выявленных коллекторов.

В вендских отложениях наилучшими коллекторскими свойствами обладают зернистые и строматолитовые доломиты, первичные ФЕС которых были достаточно высокими [16]. Основное влияние на формирование пустотного пространства пород *котоджинской* и *пойгинской* свит скв. **Восток-3** оказало развитие вторичных пор и каверн выщелачивания по наиболее перекристаллизованным участкам пород, а также трещинам и стилолитам. Согласно литологическому изучению, на качественном уровне установлено, что содержание пор и каверн в *пойгинской* свите (10–20 %) более высокое, чем в *котоджинской* (10–15 %), хотя по петрофизическим данным проницаемость и пористость матрицы пород *пойгинской* свиты несколько ниже, чем в *котоджинской*. Этот факт объясняется тем обстоятельством, что в отложениях последней преобладают поры (рис. 5, а), а в *пойгинской* свите больший объем пустотного пространства приходится на каверны (рис. 5, б), в свою очередь, крупные каверны, как правило, при обработке керна не сохраняются.

В целом же открытая пористость матрицы пород обеих свит незначительна. Значения пористости в отложениях *пойгинской* свиты находятся в пределах от 0,6 до 2,6 %, а проницаемости – от $<0,001$ до $0,2 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, в *котоджинской* свите диапазон изменения пористости – от 0,1 до 2,8 %, проницаемости – от тысячных долей до $0,7 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ [13]. Отмечаются редкие маломощные прослои с пористостью до 16,2 % и проницаемостью до

$63,4 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ [16]. Относительно низкие ФЕС обусловлены интенсивной перекристаллизацией и выполнением пустот доломитом, что значительно усложнило строение порового пространства пород. Трещиноватость развита очень широко в обеих свитах, но, судя по более полным выходам керна и меньшей его фрагментации, ее интенсивность в *котоджинской* свите снижается.

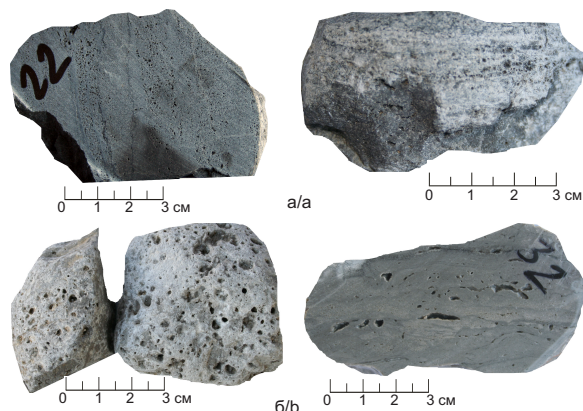


Рис. 5. Пустотное пространство в отложениях венда скв. Восток-3: а – поры в породах котоджинской свиты; б – каверны в породах пойгинской свиты

Fig. 5. Void space in the Vendian sediments of well Vostok-3: a are the pores in the rocks of kotodzhinskaya suite; b are the cavities in the rocks of poyginskaya suite

Всего на этом уровне в скв. Восток-3, в интервалах глубин от 4962,0 и до 4190,4 м, было испытано семь объектов, в пяти случаях был получен приток пластовых вод дебитом от 8,9 до 33,9 м³/сут.

Райгинская свита в разрезе скв. **Восток-3** характеризуется очень низкими фильтрационно-емкостными свойствами со значениями пористости в целом не более 0,1 % и проницаемости $\leq 0,001 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ [13].

В венд-кембрийском разрезе скважины **Вездеходная-4** выделяются карбонатная (*вездеходная*) и эффузивная (*лисицынская*) толщ, которые заметно различаются по своим литологическим и петрофизическим характеристикам (рис. 4) [15, 36].

Толща эффузивных и вулканогенных пород в интервале 4427,0–3541,5 м сложена сильно измененными разностями, значения пористости и проницаемости матрицы пород составили 0,2–1,0 % и $0,01 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ соответственно.

Породы нижней части карбонатного разреза (3541,5–3535,6 м) представлены кристаллическими, крепкими, плотными доломитовыми известняками, переходящими в известковистые доломиты. Значения пористости матрицы составили 0,2–2,0 %, проницаемости – $0,01–0,03 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$. В отложениях широко развиты трещины до 1,2–5,0 мм толщиной, а также сеть тонких трещинок и стилолитов, выполненных глинистым веществом и расположенных субпараллельно слоистости. Значение проницаемости в направлении, параллельном напластованию, достигает $0,4 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$.

Такое увеличение, более чем в 10 раз, характерно для коллекторов трещинного типа. В данной пачке, вероятно, развиты крупные открытые трещины, о наличии которых можно косвенно судить по небольшому выходу керна (около 30 %) и по геофизическим данным.

В интервале 3535,6–3500,0 м отложения представлены аргиллитами и алевро-аргиллитами с прослоями песчаников. Значения пористости матрицы небольшие – 0,2–2,9 %, проницаемости – до $0,01 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$.

В интервале 3500,0–3317,0 м отмечаются разнокристаллические пористо-кавернозные доломиты, в них просматривается первичная водорослевая структура. К перекристаллизованным участкам часто приурочены поры и каверны, занимающие от 20 до 40 % площади шлифов. Вследствие частичного заполнения пор новообразованным доломитом величина пустотного пространства значительно сокращена, вплоть до полного исчезновения. Небольшой диаметр соединительных каналов негативно повлиял на сообщаемость пор. В связи с этим породы характеризуются достаточно низкими коллекторскими свойствами: пористость матрицы составила 1,2–3,1 %, проницаемость – $0,01\text{--}2,7 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$.

Отложения в интервале 3265,0–3252,0 м представлены пористыми перекристаллизованными доломитами. Присутствуют разности с высокими значениями – до 15–20 %, проницаемости матрицы здесь изменяется от 3,3 до $6,6 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$.

Верхняя часть карбонатного разреза (инт. 3252,0–3106,4 м) сложена пористыми и кавернозными доломитами. В целом в отложениях имел место многостадийный процесс выщелачивания и заполнения пор, в результате которого сообщаемость пор и каверн стала осуществляться по тонким (0,01–0,02 мм толщиной) микротрещинам. В свою очередь, такая изолированность пустот определила относительно низкие ФЕС. Значения пористости матрицы в отложениях колеблются от 0,9 до 3,7 %, в среднем 1,5–2,5 %, а проницаемости – от 0,02 до $0,3 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ и крайне редко – 0,6 и $0,9 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$. Лишь в доломитах в интервале 3239,0–3235,0 м пористость достигает 3,6–7,2 %.

Таким образом, согласно литологическим и петрофизическим исследованиям, данным о низком выходе керна и интенсивном поглощении промышленной жидкости при прохождении рассматриваемых интервалов, можно сделать вывод о развитии в *пойгинской* свите и нижней части *вездеходной* толщи коллекторов преимущественно трещинного и каверново-трещинного типов, а в *котоджинской* свите и верхней части *вездеходной* толщи – каверново-порово-трещинного и каверново-порового типов.

Нижнекембрийские отложения, вскрытые скважинами **Восток-3** и **Восток-1**, согласно данным петрофизических исследований, характеризуются преимущественно низкими ФЕС. Средние значения пористости матрицы составляют доли %, а

проницаемости – $\leq 0,001 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$. Практически непроницаемые *чурбигинская* и *пайдугинская* свиты, наряду с *райгинской*, могут быть перспективны в качестве флюидоупора для нижележащих доломитов *пойгинской* и *котоджинской* свит, вскрытых скв. **Восток-3** (рис. 6). Низкие коллекторские свойства рассматриваемых толщ обусловлены в первую очередь их неоднородным строением, в котором принимают участие различные типы карбонатных, терригенных, глинистых и смешанных пород, находящихся в разномасштабном переслаивании.

В *чурбигинской* свите, представленной переслаиванием пелитоморфных известняков, известково-глинистых и глинистых пород, фиксируются минимально низкие значения пористости и проницаемости (от 0 до 0,3 %; $\leq 0,001 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$).

Вышележащая *пайдугинская* свита сложена углеродсодержащими тонкослоистыми алевроит-карбонатно-глинистыми породами с крайне низкой емкостью матрицы – 0,1–0,2 %, и проницаемостью – $\leq 0,001 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, за исключением единичного микрит-микробияльного образца с чуть более высокими значениями – 1 % и $0,2 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$.

Переслаивающиеся, в разной степени седиментационно нарушенные карбонатные и алевроит-карбонатно-глинистые породы *пуджелгинской* свиты характеризуются чуть более высокими значениями пористости по сравнению с подстилающими отложениями – от 0,1 до 0,9 %, и проницаемости – $\leq 0,001 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, несмотря на появление прослоев, обогащенных силикокластикой. Несмотря на более высокие значения проницаемости ($0,1\text{--}0,7 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$) фиксируются в интракластовых известковых брекчиях.

В разрезе среднекембрийской *поделгинской* свиты отмечаются интервалы с относительно повышенными показаниями пористости матрицы (0,5–3,4 %), приуроченные к прослоям, обогащенным силикокластикой. Однако значения проницаемости минимальные. Очевидно, что сульфатизация рассматриваемых отложений отрицательно повлияла на их коллекторские свойства.

Кондесская свита в целом имеет обломочно-известняковый состав с менее распространенными прослоями, обогащенными глинистым веществом, доломитом и ангидритом, что отразилось на чуть более высоких в среднем, по сравнению с нижележащими толщами, значениях пористости. Показания пористости изменяются в разрезе от 0,1 до 3,1 %, а проницаемости – от 0 до $2,4 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$. Более высокие значения отмечаются в прослоях зернистых оолитовых известняков.

В составе *шеделгинской* свиты принимают участие разнообразные типы пород. Свита подразделяется на две подсвиты. В обеих подсвитах преобладают породы со средней емкостью около 0,2–0,5 % и проницаемостью $\leq 0,001 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$. Однако отмечаются уровни, распространенные главным образом в верхней подсвите, с более высокими значениями пористости – 0,5–1,8 %, и проница-

емости – $0,2-7,0 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$. Данные участки приурочены к зернистым известнякам с примесью силикокластического материала или интракластическим брекчиям. В нижней подсвите их практически нет, что связано, по-видимому, с ее сульфатизацией [16].

Пыжинская свита отличается от подстилающих отложений значительно большей примесью глинистого и алевритоглинистого вещества, что нашло отражение в невысоких значениях пористости и проницаемости матрицы – 0–1 % и $\leq 0,001 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ соответственно. Только в прикро-

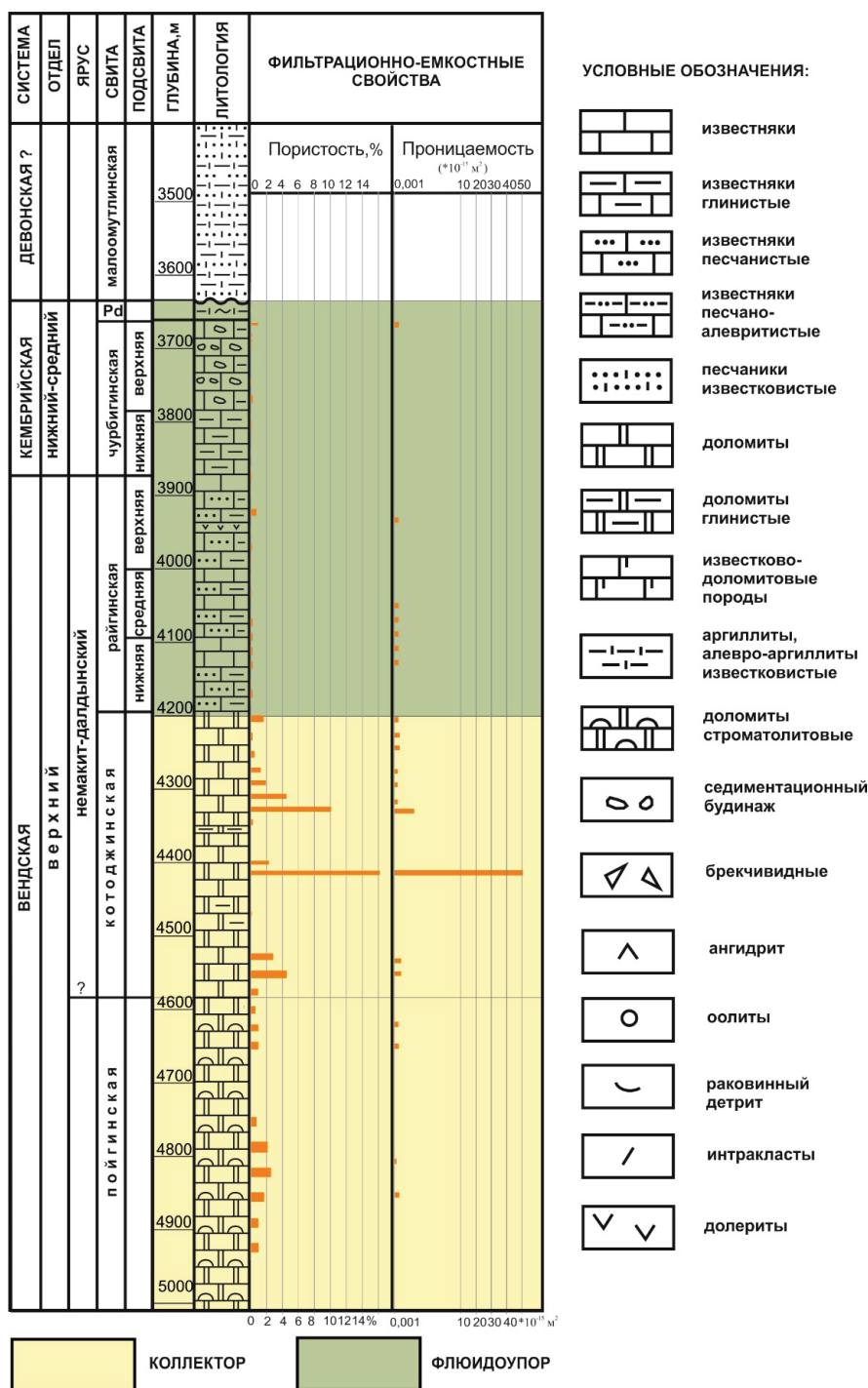


Рис. 6. Коллекторы и флюидоупоры в разрезе скважины Восток-3

Fig. 6. Collectors and confining beds in the section of the well Vostok-3

вельной части свиты в единичных образцах фиксируется некоторое повышение пористости до 1,7–5,0 % и проницаемости до $1,2 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, что связано, вероятно, с некоторой дезинтегрированностью пород на границе с мезозойским комплексом.

В скважине **Восток-1** всего было испытано девять объектов. Значительный приток пластовой воды был получен в интервалах 2762,0–2758,0 м и 2799,8–2776,8 м и приурочен к зоне контакта с мезокайнозойским осадочным чехлом. Остальные объекты оказались «сухими».

Таким образом, в венд-кембрийской части разреза по петрофизическим и литологическим данным в качестве коллекторов можно рассматривать доломиты *пойгинской*, *котоджинской* свит и *вездеходной* толщи. Карбонатно-глинистые отложения *райгинской*, *чурбигинской* и *пайдугинской* свит могут выступать в качестве флюидоупоров (рис. 6).

В кембрийской части разреза скважины **Восток-1** выделяются несколько проницаемых уровней разделенных многочисленными непроницаемыми пластами карбонатно-терригенных и карбонатно-эвапоритовых пород. В качестве коллекторов выступают прослой зернистых карбонатных типов в составе *поделгинской*, *кондесской* и *шеделгинской* свит. Общим региональным флюидоупором служат отложения *пыжинской* свиты, в этой части бассейна ее мощность достигает 600 м (рис. 7).

В скважине **Восток-4** наилучшими коллекторскими свойствами обладают породы нижней подсвиты *оксымской* свиты в инт. 5100,0–4953,0 м (рис. 8). Породы в основном представлены пористыми, кавернозными и трещиноватыми доломитами. На некоторых уровнях трещиноватость проявлена настолько сильно, что керн фрагментирован на обломки 0,5–2,0 см параллельно наложению, в результате породы приобретают тонкоплитчатый облик. Для биоморфных (строматолитовых) типов доломитов *оксымской* свиты характерны неравномерно развитые пористость и кавернозность. Кавернозность может достигать 10–20 %, в исключительных случаях – 30–50 % от объема породы (инт. 5015,5–5009,6 м).

В пределах нижней подсвиты *оксымской* свиты пористость матрицы кавернозных доломитов варьирует от 5,8 до 11,4 %, проницаемость изменяется от $1,5 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ до $124,5 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$. Наилучшими коллекторскими свойствами обладают кавернозные доломиты интервалом 5024,0–5009,6 м с максимальными значениями пористости 8,2–11,4 % и проницаемости $165,5\text{--}240,5 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$.

Таким образом, сочетание порово-кавернового коллектора, фильтрационно-емкостные свойства которого подтверждены количественными лабораторными методами, с трещинным позволяет рассматривать нижнюю подсвиту *оксымской* свиты как потенциальный коллектор углеводородов – самый перспективный в домезозойской части разреза скв. **Восток-4**. Фильтрационно-емкостные свойства образцов верхней подсвиты *оксымской* свиты

характеризуются малой пористостью и проницаемостью.

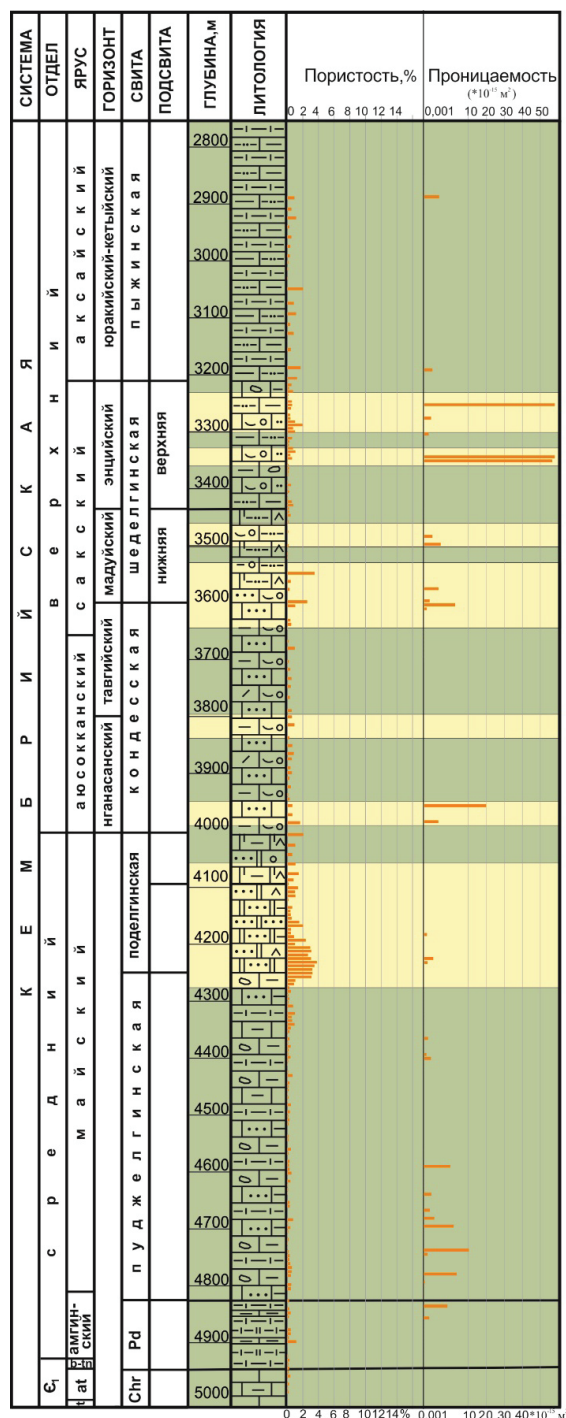


Рис. 7. Коллекторы и флюидоупоры в разрезе скважины Восток-1 (условные обозначения см. на рис. 6)

Fig. 7. Collectors and confining beds in the section of the well Vostok-1 (see legend in Fig. 6)

В параметрической скважине **Восток-4** в *оксымской* свите было испытано 3 объекта в интервалах глубин 5036,0–5028,0 и 4996,0–4993,0 м. В результате был получен приток пластовой воды, максимальный дебит которого составил $15,2 \text{ м}^3/\text{сут.}$

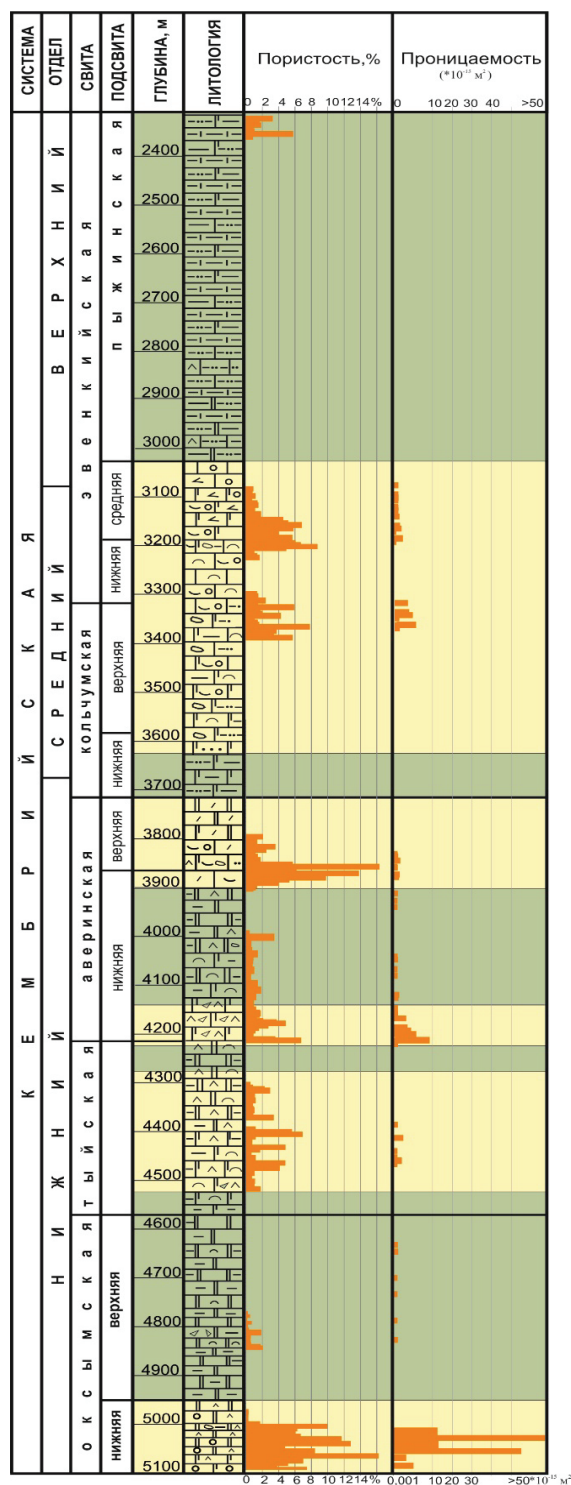


Рис. 8. Коллекторы и флюидоупоры в разрезе скважины Восток-4 (условные обозначения см. на рис. 6)

Fig. 8. Collectors and confining beds in section of the well Vostok-4 (see legend in Fig. 6)

Залегающая выше тыйская свита характеризуется неоднородностью состава и разнообразием структурных признаков, что находит отражение в фильтрационно-емкостных свойствах пород. В нижней части свиты преобладают седиментационные

ангидритовые и карбонатно-ангидритовые брекчии, а в верхней – градиционно-слоистые глинисто-доломит-ангидритовые породы. Доминирующие значения пористости матрицы пород не превышают 1 %. В малой доле образцов значения составляют от 1 до 6,6 %. Проницаемость испытанных образцов мала, преобладают значения $<0,001 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$. Иногда они находятся в пределах $1 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, единично достигают значения $2,5 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ и $4,6 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$. Наличие многочисленных прослоев с порами и кавернами выщелачивания в зернистых доломитах свиты, отмечаемых в керновом материале в скв. Лемок-1 и Восток-4, указывает на высокую потенциальную возможность формирования здесь коллекторов порового типа. А прослой глинисто-доломит-ангидритовых пород в составе свиты можно рассматривать как неоднородный по качеству и мощности флюидоупор сульфатно-карбонатного, глинисто-карбонатно-сульфатного состава [16].

Аверинская свита в литологическом отношении состоит из двух существенно различающихся частей, что отчетливо выражено в облике и физических свойствах пород. В нижней части преобладают брекчии ангидрит-известково-доломитового состава. Выше по разрезу отмечаются пакеты переслаивания тонкослоистых глинисто-известковых, микритовых, микритово-зернистых и строматолитовых доломитов.

Породы нижней части аверинской свиты обладают низкими фильтрационно-емкостными свойствами. Минимальное значение пористости матрицы составляет 0,24 %, максимальное достигает 3,4 и 4,5 %. Проницаемость не превышает $1 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$. Однако присутствие брекчий и наличие тектонизированных зон указывает на высокую потенциальную возможность формирования трещинно-кавернозного коллектора углеводородов в нижней части разреза свиты.

Верхнеаверинская подсвита неоднородна по фильтрационно-емкостным свойствам. Для зернистых карбонатных пород преобладающие значения пористости не превышают 1–3 %, иногда они составляют 5,8 %. Проницаемость образцов по петрофизическим данным мала, подавляющее большинство значений составляют $0,06–0,38 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$. Максимально высокое значение пористости матрицы зафиксировано в комковато-обломочных доломитах – 9,4–15,9 %, что связано с выщелачиванием пород по межзерновому пространству. Здесь значения проницаемости матрицы достигают $1,3 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$. Значения пористости, согласно результатам интерпретации ГИС, в этих участках составляют в среднем около 15 %, редко достигая 25 %. В верхней части толщи, в перекристаллизованных биотурбированных доломитах, проницаемость пород достигает значений до $3,2 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$.

В кольчумской свите значения пористости матрицы изменяются в диапазоне 0,3–6,2 %, проницаемости – $0,1–3,2 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$. В составе свиты, по данным ГИС, в интервале 3545,0–3450,0 м выде-

ляется три пласта со средними значениями пористости 15 %, 18 %, 35–38 %, эти же данные свидетельствуют о развитии преимущественно порового типа коллектора. При испытании пластов в интервале 3532,0–3520,0 м и совместном испытании пластов в интервалах 3532,0–3520,0 м и 3503,0–3487,0 м был получен приток минерализованной воды. Максимальный дебит составил 98 м³/сут.

В *эвенкийской* свите коллектор сложен оолито-во-комковатыми, сгустковыми известняками, пертерпевшими доломитизацию. Значения пористости изменяются от 0,8 до 5,4 %, составляя в среднем около 3 %. Пустотное пространство имеет межзерновую и межкристаллическую природу. В известняках неравномерно встречаются округлые фенестры размером до 3 мм прозрачного кристаллического кальцита, в центральных частях которых наблюдается межкристаллическое пустотное пространство. Для пород характерна неравномерная пропитка тонкодисперсным битуминозным веществом. Породы монолитные, трещиноватость для них не характерна, изредка происходит фрагментация зерна по поверхностям крупных стилолитов. Значения пористости, согласно результатам интерпретации ГИС, составляют в среднем около 5–8 %. Эти же данные говорят о преимущественно трещинно-каверновом и каверновом типах коллектора пластов резервуара. Испытанию была подвергнута только верхняя половина свиты (3048,0–3026,0 м), где получен приток минерализованной воды с максимальным дебитом 4,5 м³/сут.

В результате проведенных исследований в скважине **Восток-4** выделяются 5 уровней коллекторов, разделенных флюидоупорами: *нижнеоксымский*, выделенный в призабойной части скважины, наиболее перспективный в домезозойской части разреза скв. **Восток-4**, флюидоупором служат отложения *верхнеоксымской* и нижней части *тыйской* свит, общей мощность около 800 м; *тыйский*, ограниченный прослоями глинисто-доломит-ангидритовых пород в составе свиты; *нижнеаверинский*, выделенный в нижней части *аверинской* свиты, флюидоупором служат отложения верхней части *аверинской* свиты; и последний, состоящий из проницаемых интервалов в составе *верхнекольчумской* и *нижне-среднеэвенкийских* подсвит. Общим флюидоупором для всех выделенных пород-коллекторов могут служить перекрывающие отложения *пыжинской* свиты, в этой части бассейна ее мощность достигает 800 м (рис. 8).

Выявленные уровни в кембрийской части разреза имеют литологическую и фаціальную выдержанность, что подтверждается по результатам интерпретации геофизических данных, и прослеживаются в разрезах скважин **Лемок-1**, **Аверинская-150** и **Тыйская-1**.

В скважине **Лемок-1** значения пористости пород находятся в пределах 1–20 % (основная масса – 1–10 %), а проницаемости – от 0,01 до 1·10⁻¹⁵ м²,

хотя в отдельных прослоях установлены и значения 10–1000·10⁻¹⁵ м². В основном породы в этих интервалах представлены зернистыми пористыми и кавернозными доломитами. Кроме того, по данным исследователей [11, 13, 22 и др.] в разрезе скважины **Лемок-1** на глубинах 2120,0 м и 2190,0 м (низ *эвенкийской* свиты или ее аналогов) в керне была зафиксирована «живая» нефть. В интервалах 2900,0 м (*аверинская* свита) и 3180,0–3130,0 м (приграничный уровень *аверинской* и *тыйской* свит) был зафиксирован запах нефти, а хлороформенная экстракция показала достаточно высокие содержания хлороформенных битумоидов. Пористость матрицы пород в этих участках достигает 12 %. Исследование образцов, нафтидов, выделенных из нефтенасыщенных горизонтов, показало, что это нефти, которые не подверглись биодеградации. Флюидоупорами для рассмотренных выше коллекторских горизонтов служат плохо проницаемые сульфатсодержащие породы – аналоги *эвенкийской* свиты, и сульфатно-карбонатные породы – аналоги *аверинской* свиты.

Все перечисленные отложения сформировались в мелководном морском бассейне, имевшем весьма широкое распространение. Литологическая и фаціальная выдержанность разреза на значительных территориях подтверждается и по результатам сейсмических исследований. Поэтому есть все основания считать, что рассмотренные выше резервуары в кембрийском разрезе и охарактеризованные в скв. **Восток-4** имеют широкое распространение. Таким образом, можно говорить о наличии во вскрытом разрезе скв. **Лемок-1** двух достаточно мощных (до 50 м) горизонтов пород-коллекторов, перекрытых надежными флюидоупорами [16].

Исследование коллекторских свойств пород скв. **Аверинская-150** показало, что значения пористости матрицы изменяются от 0,3 до 2,7 %, проницаемости – от 0,06 до 0,1·10⁻¹⁵ м². Максимальные значения ФЕС приурочены к горизонтам *бельской* свиты (инт. 2824,0–1930,0 м), здесь они достигают значений 18,0–19,6 %, а проницаемости – 7,1–7,9·10⁻¹⁵ м². Отмечаемые породные ассоциации аналогичны таковым в *верхнеоксымской* подсвите скважины **Восток-4**. Прослои представлены зернистыми микрит-микробиальными, комковатыми, водорослевыми известняками с колониальными структурами сине-зеленных водорослей (типа *Renalcis*) и темно-коричневыми строма-толитовыми известняками [16].

Исследование коллекторских свойств пород скв. **Тыйская-1** показало, что вскрытая 500-метровая кембрийская толща (аналоги *тыйской* и *аверинской* свит) имеет горизонты с удовлетворительными ФЕС. При среднем значении пористости 1–6 % в разрезе выделяются интервалы со значениями этого параметра до 10–20 % и выше [7].

Судя по литологическим, петрофизическим исследованиям и данным ГИС скважин **Восток-1**, **4** и **Лемок-1**, флюидоупорные свойства пород *пыжин-*

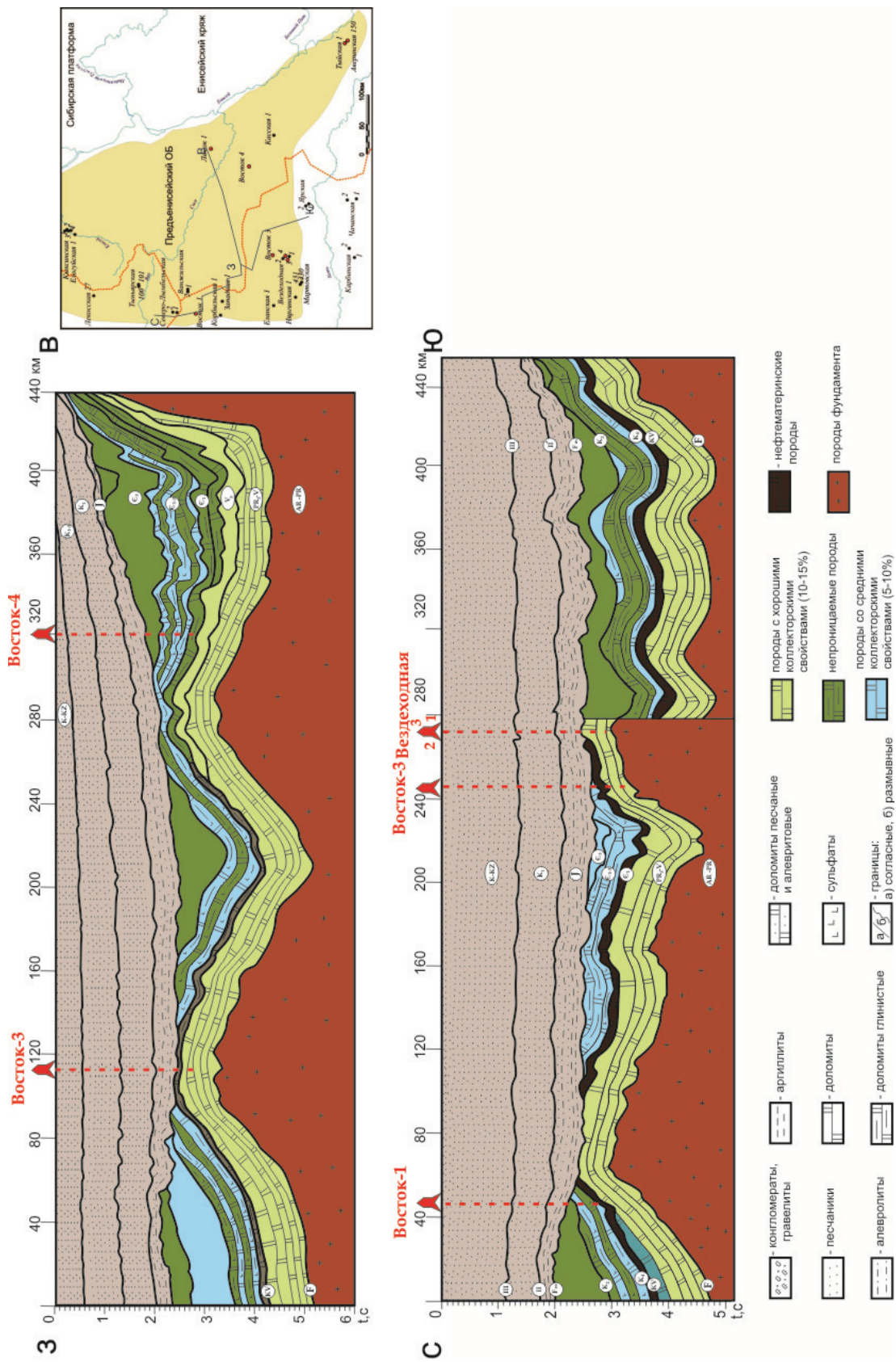


Рис. 9. Разрез потенциально нефтегазовых венд-кембрийских отложений Предъенисейского бассейна [по материалам 10–16]

ской свиты довольно стабильны по всей мощности. Учитывая эти факторы, свиту можно рассматривать в качестве регионального флюидоупора.

Выводы

Основные результаты исследования венд-кембрийских отложений, вскрытых параметрическими скважинами в южной части Предьенисейской нефтегазоносной субпровинции, сводятся к следующему:

1. Наилучшие ФЕС наблюдаются в биоморфных и зернистых карбонатных породах (*пойгинской, котоджинской, вездеходной, нижнеоксмынской, шеделгинской, кольчумской и эвенкийской свит*), сформированных в обстановках отмелей и слабо выраженных межбаровых депрессий в рамках карбонатного шельфа.
2. Пустотное пространство потенциальных коллекторов отличается сложностью и неравномерностью распространения пор, каверн и тре-

щин. Интенсивно проявившиеся вторичные процессы запечатывания первичных пустот доломитом, галитом и ангидритом привели к тому, что первично высокопористые породы частично утратили свою емкость. Процессы перекристаллизации, выщелачивания и стилолитизации обеспечили развитие дополнительных видов пустот. Характер проявления постседиментационных процессов в вендских отложениях предопределил преимущественное развитие каверново-порового и каверново-порово-трещинных типов коллекторов; в кембрийских отложениях – коллекторов порового, порово-каверново-трещинного и трещинно-порового типов.

3. Литологическая и фациальная выдержанность рассматриваемого разреза позволяет считать, что выделенные коллекторы и флюидоупоры имеют широкое распространение на всей территории исследования (рис. 9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шатский Н.С. Проблемы нефтеносности Сибири // Нефтяное хозяйство. – 1932. – Т. 24. – № 9. – С. 131–140.
2. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности Западно-Сибирской низменности / под ред. Н.Н. Ростовцева. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, 1958. – 391 с.
3. Палеозой юга Западно-Сибирской равнины / О.И. Богущ, В.С. Бочкарев, О.В. Юферев. – Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1975. – 44 с.
4. Геология нефти и газа Сибирской платформы / А.Э. Конторович, В.С. Сурков, А.А. Трофимук. – М.: Недра, 1981. – 552 с.
5. Фундамент и развитие платформенного чехла Западно-Сибирской плиты / В.С. Сурков, О.Г. Жеро. – М.: Недра, 1981. – 143 с.
6. Дашкевич Н.Н., Каштанов В.А. Платформенные отложения палеозоя и подсолоневые комплексы докембрия левобережья р. Енисей – новый объект нефтегазопроисковых работ // Доклады АН СССР. – 1990. – Т. 315. – № 5. – С. 1187–1191.
7. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности палеозойских отложений левобережья р. Енисей (Тыйская параметрическая скважина) / В.А. Каштанов, А.И. Варламов, В.П. Данилова, Н.Н. Дашкевич, А.С. Ефимов, В.И. Ильина, Е.А. Костырева, В.Н. Меленевский, К.Л. Пак, Ю.Ф. Филиппов, Л.Д. Чунихина. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1995. – 52 с.
8. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Палеозой Западной Сибири / Е.А. Елкин, В.И. Краснов, Н.К. Бахарев, Е.В. Белова, В.Н. Дубатовлов, Н.Г. Изох, А.Г. Клец, А.Э. Конторович, Л.Г. Перегудов, Н.В. Сенников, И.Г. Тимохина, В.Г. Хромых. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2001. – 163 с.
9. Геолого-геохимические предпосылки нефтегазоносности кембрия и верхнего протерозоя юго-востока Западной Сибири / А.Э. Конторович, А.С. Ефимов, В.А. Кринин, А.В. Хоменко, Л.Г. Гилинская, В.П. Данилова, В.Н. Меленевский, Е.А. Костырева, Е.Н. Махнева, Н.Т. Юдина // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41. – № 12. – С. 1615–1636.
10. Предьенисейская нефтегазоносная область – новый перспективный объект поисков нефти и газа в Сибири / А.Э. Конторович, В.А. Конторович, Ю.Ф. Филиппов, С.Ю. Беляев, В.А. Каштанов, А.В. Хоменко, Л.М. Бурштейн, В.И. Вальчак, А.С. Ефимов, А.А. Конторович, В.Н. Петров // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2006. – № 5–6. – С. 9–23.
11. Новый тип разреза кембрия в восточной части Западно-Сибирской плиты (по результатам бурения параметрической скважины Восток-1) / А.Э. Конторович, А.И. Варламов, В.Г. Емешев, А.С. Ефимов, А.Г. Клец, А.В. Комаров, В.А. Конторович, И.В. Коровников, С.В. Сараев, Ю.Ф. Филиппов, И.В. Вараксина, В.Н. Глинских, В.А. Лучинина, Н.В. Новожилова, Т.В. Петель, Н.В. Сенников, А.В. Тимохин // Геология и геофизика. – 2008. – Т. 49. – № 11. – С. 1119–1128.
12. Разрез венда восточной части Западно-Сибирской плиты (по результатам бурения параметрической скважины Восток-3) / А.Э. Конторович, А.И. Варламов, Д.В. Гражданкин, Г.А. Карлова, А.Г. Клец, В.А. Конторович, С.В. Сараев, А.А. Терлеев, С.Ю. Беляев, И.В. Вараксина, А.С. Ефимов, Б.Б. Кочнев, К.Е. Наговицин, А.А. Постников, Ю.Ф. Филиппов // Геология и геофизика. – 2008. – Т. 49. – № 12. – С. 1238–1247.
13. Геохимия органического вещества кембрия Предьенисейской субпровинции (по результатам бурения скважин Восток-1 и Восток-3) / А.Э. Конторович, Е.А. Костырева, С.В. Сараев, В.Н. Меленевский, А.Н. Фомин // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 6. – С. 737–750.
14. Разрез кембрия в восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы (по результатам бурения параметрической скважины Восток-4) / А.Э. Конторович, В.А. Конторович, И.В. Коровников, С.В. Сараев, Н.В. Сенников, Ю.Ф. Филиппов, А.И. Варламов, А.С. Ефимов, Ю.А. Филиппов, А.А. Постников, А.А. Терлеев, Г.А. Карлова, К.Е. Наговицин, Д.А. Токарев, Т.П. Батурина, И.А. Губин, Б.Б. Кочнев, Н.В. Новожилова, В.А. Лучинина // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53. – № 10. – С. 1273–1284.
15. Филиппов Ю.Ф., Конторович В.А., Сенников Н.В. Новый взгляд на схему стратиграфии палеозоя юго-востока Западной Сибири // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2014. – № 2. – С. 7–21.
16. Тумашов И.В. Строение, состав, обстановки формирования резервуаров нефти и газа в венде и кембрии южной части Предьенисейской нефтегазоносной субпровинции: дис. ... канд. геол.-минер. наук. – Новосибирск, 2014. – 206 с.
17. Венд Предьенисейского осадочного бассейна (юго-восток Западной Сибири) / Д.В. Гражданкин, А.Э. Конторович, В.А. Конторович, С.В. Сараев, Ю.Ф. Филиппов, А.С. Ефимов, Г.А. Карлова, Б.Б. Кочнев, К.Е. Наговицин, А.А. Терлеев,

- Г.О. Федянин // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56. – № 4. – С. 718–734.
18. Biogeochemistry of the neoproterozoic organic matter in the south-east of the Siberian Platform / A.E. Kontorovich, I. Timoshina, P. Sobolev, K. Nagovitsin // Organic Geochemistry: Trends for the 21st Century: Book of Abstracts of the Communications presented to the 26th International Meeting on Organic Geochemistry. – Costa Adeje, Tenerife, Spain, September 15–20, 2013 – V. 2. – P. 255–256.
19. Revised Neoproterozoic and Terreneuvian stratigraphy of the Lena-Anabar Basin and north-western slope of the Olenek Uplift, Siberian Platform / K.E. Nagovitsin, V.I. Rogov, V.V. Marusin, G.A. Karlova, A.V. Kolesnikov, N.V. Bykova, D.V. Grazhdankin // Precambrian Research. – 2015. – V. 270. – P. 226–245.
20. Grazhdankin D., Maslov A. The room for the Vendian in the Standard Global Chronostratigraphic Chart // 2nd International Congress on Stratigraphy (STRATI 2015). – Graz, Austria, 19–23 July 2015. – P. 141.
21. Мельников Н.В. Венд-кембрийский соленосный бассейн Сибирской платформы (Стратиграфия, история развития). – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – 148 с.
22. Решения четвёртого Межведомственного регионального стратиграфического совещания по уточнению и дополнению стратиграфических схем венда и кембрия внутренних районов Сибирской платформы. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1989. – 64 с.
23. Тумашов И.В. Литология венд-нижекембрийских отложений Предъенисейской нефтегазоносной субпровинции (по результатам бурения параметрических скважин Восток-1, 3, 4) // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 99–104.
24. Folk R.L. Practical petrographic classification of limestone // Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol. – 1959. – V. 43. – № 1. – P. 1–38.
25. Dunham R. Classification of carbonate rocks according to depositional texture // Bull. Amer. Petrol. – 1962. – Mem. 1. – P. 108–121.
26. Monty C.L.V. Distribution and structure of recent siromalolitic algal mats. Eastern Andros Island, Bahamas // Ann. Soc. Geol. Belg. Bull. – 1967. – V. 90. – № 1/3. – P. 55–100.
27. Wilson J.L. Carbonate Facies in Geologic History. – New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1975. – 471 p.
28. Burne R.V., Moore L.S. Microbialites: organosedimentary deposits of benthic microbial communities // Palaios. – 1987. – V. 2. – P. 241–254.
29. Flügel E. Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application. Second Edition. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – 1006 p.
30. Bjorlykke K. Relationships between depositional environments, burial history and rock properties. Some principal aspects of diagenetic process in sedimentary basins // Sedimentary Geology. – 2014. – V. 301. – P. 1–14.
31. Characterization and origin of permeability-porosity heterogeneity in shallow-marine carbonates: from core scale to 3D reservoir dimension (Middle Jurassic, Paris Basin, France) / B. Brigaud, B. Vincent, C. Durlot, J. Deconinck, E. Jobard, N. Pickard, B. Yven, P. Landrein // Marine and Petroleum Geology. – 2014. – V. 57. – P. 631–651.
32. Thomson D., Rainbird R.H., Dix G. Architecture of a Neoproterozoic intracratonic carbonate ramp succession: Wynnatt Formation, Amundsen Basin, Arctic Canada // Sedimentary Geology. – 2014. – V. 299. – P. 119–138.
33. Sedimentology of an early Cambrian tide-dominated embayment: Quyu formation, Victoria Island, Arctic Canada / A.M. Durban, B.R. Pratt, T. Hadlari, K. Dewing // Sedimentary Geology. – 2015. – V. 320. – P. 1–18.
34. Gao Z., Fan T. Carbonate platform-margin architecture and its influence on Cambrian-Ordovician reef-shoal development, Tarim Basin, NW China // Marine and Petroleum Geology. – 2015. – V. 68. – P. 291–306.
35. Багринцева К.И. Карбонатные породы – коллекторы нефти и газа. – М.: Недра, 1977. – 231 с.
36. Геологическое строение доюрского основания Западно-Сибирской плиты в пределах Кеть-Тымского междуречья / Г.Д. Исаев, С.Н. Макаренко, М.Е. Раабен, В.И. Биджаков, И.И. Коптев. – Новосибирск: Новосибирский гос. ун-т, 2003. – 34 с.

Поступила 06.09.2016 г.

Информация об авторах

Тумашов И.В., кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник лаборатории седиментологии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

Вараксина И.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории седиментологии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

UDC 553.98.061.12/17

COLLECTORS AND CONFINING BEDS IN DEPOSITS OF THE VEND AND CAMBRIAN AT THE PREDYENISEY OIL-AND-GAS AREA (THE SOUTHEAST OF WEST SIBERIA)

Igor V. Tumashov¹,
TumashovIV@ipgg.nsc.ru

Irina V. Varaksina¹,
VaraksinaIV@ipgg.nsc.ru

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3, Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of research. For the first time five potential levels of oil-and-gas collectors and confining beds have been identified in the Vendian-Cambrian section of the Predyenisey oil-and-gas area. These results were obtained by the detailed lithological studies of borehole cores (the Averinskaya-150; Vezdehnaya-3,4; Vostok-1,3,4; Lemok-1) and generalization of the actual geological and geophysical information about the region. These wells were drilled in the southern part of the Predyenisey sedimentary basin.

The main aim of the study is to determine scientific directions of searching for oil and gas fields in the territory of the Predyenisey oil-and-gas area.

The methods used in the study: detailed description of core boreholes, petrographic study of the rocks, genetic analysis of various types of sediments and clarification of the conditions of their sedimentation, analysis of GIS results, paleontological studies, temporary seismic sections, study of the void space of rocks in cores and thin sections, analysis of the results of testing wells and reservoir properties, establishment of relationship between lithological features of the rocks and their reservoir properties.

The results. The authors identified that formations of stromatolite laminites and grapestones have the best primary reservoir properties. Postsedimentary changes appeared most intensively in these rocks that promoted formation of the cavity-fracture reservoir rocks. Five potential oil and gas reservoirs in the Vendian-Cambrian section were determined.

Key words:

Predyenisey oil-and-gas area, reservoirs, collectors, confining beds, Vend-Cambrian deposits.

REFERENCES

- Shatskiy N.S. Problemy neftenosnosti Sibiri [Problems of oil potential of Siberia]. *Neftyanoe khozaystvo*, 1932, vol. 24, no. 9, pp. 131–140.
- Geologicheskoe stroenie i perspektivy neftegazonosnosti Zapadno-Sibirskoy nizmennosti [Geology and petroleum potential of the West Siberian Plain]. Ed. by N.N. Rostovtsev. Moscow, State scientific and technical publishing house of literature on the ecology and conservation of resources, 1958. 391 p.
- Bogush O.I., Bochkarev V.S., Yuferev O.V. *Paleozoy yuga Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Paleozoic of the south of West Siberian plain]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1975. 44 p.
- Kontorovich A.E., Surkov V.S., Trofimuk A.A. *Geologiya nefti i gaza Sibirskoy Platformy* [Geology of oil and gas of the Siberian Platform]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 552 p.
- Surkov V.S., Zhernov O.G. *Fundament i razvitie platformennogo chekhla Zapadno-Sibirskoy plity* [The base and development of the platform cover of the West Siberian Plate]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 143 p.
- Dashkevich N.N., Kashtanov V.A. Platformennyye otlozheniya paleozoya i podsolevye komplekсы dokembriya levoberezhya r. Enisey – novyy obekt neftegazoposkovykh rabot [Platform deposits of Paleozoic and sub-salt complexes of the Precambrian on the left bank of the Yenisei river – new object of oil and gas exploration]. *Reports of the AN SSSR*, 1990, vol. 315, no. 5, pp. 1187–1191.
- Kashtanov V.A., Varlamov A.I., Danilova V.P., Dashkevich N.N., Efimov A.S., Ilina V.I., Kostyreva E.A., Melenevskiy V.N., Pak K.L., Filippov Yu.F., Chumikhina L.D. *Geologicheskoe stroenie i perspektivy neftegazonosnosti paleozoyskikh otlozheniy levoberezhya r. Enisey (Tyiskaya parametricheskaya skvazhina)* [Geological structure and petroleum potential of Paleozoic deposits of the left bank of the Yenisei river (Tyiska parametric well)]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 1995. 52 p.
- Elkin E.A., Krasnov V.I., Bakharev N.K., Belova E.V., Dubatov V.N., Izokh N.G., Klets A.G., Kontorovich A.E., Peregoedov L.G., Sennikov N.V., Timokhina I.G., Khromykh V.G. *Stratigrafiya neftegazonosnykh basseynov Sibiri. Paleozoy Zapadnoy Sibiri* [Stratigraphy of petroleum basins of Siberia. The Paleozoic of Western Siberia]. Novosibirsk, GEO SO RAN Publ., 2001. 163 p.
- Kontorovich A.E., Efimov A.S., Krinin V.A., Khomenko A.V., Gilinskaya L.G., Danilova V.P., Melenevskiy V.N., Kostyreva E.A., Makhneva E.N., Yudina N.T. Geological and geochemical preconditions of oil and gas potential of the Upper Proterozoic and Cambrian southeast of Western Siberia. *Geologiya i geofizika*, 2000, vol. 41, no. 12, pp. 1615–1636. In Rus.
- Kontorovich A.E., Kontorovich V.A., Filippov Yu.F., Belyaev S.Yu., Kashtanov V.A., Khomenko A.V., Burshteyn L.M., Valchak V.I., Efimov A.S., Kontorovich A.A., Petrov V.N. The Predyenisey oil-and-gas area is a promising new object of oil and gas exploration in Siberia [Geologiya, geofizika i razrabotka nefteanykh i gazovykh mestorozhdeniy], 2006, no. 5–6, pp. 9–23. In Rus.
- Kontorovich A.E., Varlamov A.I., Emeshev V.G., Efimov A.S., Klets A.G., Komarov A.V., Kontorovich V.A., Korovnikov I.V., Saraev S.V., Filippov Yu.F., Varaksina I.V., Glinskikh V.N., Luchina V.A., Novozhilova N.V., Petel T.V., Sennikov N.V., Timokhin A.V. A new type section of the Cambrian in the Eastern part of West Siberian plate (based on the results of drilling the parametric well Vostok-1). *Geologiya i geofizika*, 2008, vol. 49, no. 11, pp. 1119–1128. In Rus.
- Kontorovich A.E., Varlamov A.I., Grazhdankin D.V., Karlova G.A., Klets A.G., Kontorovich V.A., Saraev S.V., Terleev A.A., Belyaev S.Yu., Varaksina I.V., Efimov A.S., Kochnev B.B., Nagovitsyn K.E., Postnikov A.A., Filippov Yu.F. A section of the Vendian of the Eastern part of West Siberian plate (based on the results of drilling the parametric well Vostok-3). *Geologiya i geofizika*, 2008, vol. 49, no. 12, pp. 1238–1247. In Rus.

13. Kontorovich A.E., Kostyreva E.A., Saraev S.V., Melenevskiy V.N., Fomin A.N. Geochemistry of organic matter of the Cambrian of the Predyensey oil-and-gas subprovince (based on the results of drilling wells Vostok-1 and Vostok-3). *Geologiya i geofizika*, 2011, vol. 52, no. 6. pp. 737–750. In Rus.
14. Kontorovich A.E., Kontorovich V.A., Korovnikov I.V., Saraev S.V., Sennikov N.V., Filippov Yu.F., Varlamov A.I., Efimov A.S., Filiptsov Yu.A., Postnikov A.A., Terleev A.A., Karlova G.A., Nagovitsyn K.E., Tokarev D.A., Baturina T.P., Gubin I.A., Kochnev B.B., Novozhilova N.V., Luchinina V.A. The section of the Cambrian in the eastern part of the West Siberian geosyncline (based on parametric drilling well Vostok-4). *Geologiya i geofizika*, 2012, vol. 53, no. 10, pp. 1273–1284. In Rus.
15. Filippov Yu.F., Kontorovich V.A., Sennikov N.V. A new look at the scheme of stratigraphy of the Paleozoic of the South-East of Western Siberia. *Geologiya i mineralno-syirevye resursy Sibiri*, 2014, no. 2. pp. 7–21. In Rus.
16. Tumashov I.V. *Stroenie, sostav, obstanovki formirovaniya rezervuarov nefi i gaza v vende i kembrii yuzhnoy chasti Predeniseyskoy neftegazonosnoy subprovintsii*. Dis. Kand. nauk [Structure, composition, conditions of formation of oil and gas reservoirs in the Vendian and Cambrian of the southern Predyensey oil-and-gas subprovince. Cand. Diss.]. Novosibirsk, 2014. 206 p.
17. Grazhdankin D.V., Kontorovich A.E., Kontorovich V.A., Saraev S.V., Filippov Yu.F., Efimov A.S., Karlova G.A., Kochnev B.B., Nagovitsyn K.E., Terleev A.A., Fedyanin G.O. Vend of Predyensey sedimentary basin (South-East of Western Siberia). *Geologiya i geofizika*, 2015, vol. 56, no. 4, pp. 718–734. In Rus.
18. Kontorovich A.E., Timoshina I., Sobolev P., Nagovitsyn K. Bio-geochemistry of the neoproterozoic organic matter in the south-east of the Siberian Platform. *Organic Geochemistry: Trends for the 21st Century: Book of Abstracts of the Communications presented to the 26th International Meeting on Organic Geochemistry*. Costa Adeje, Tenerife, Spain, September 15–20, 2013. Vol. 2, pp. 255–256.
19. Nagovitsyn K.E., Rogov V.I., Marusin V.V., Karlova G.A., Kolesnikov A.V., Bykova N.V., Grazhdankin D.V. Revised Neoproterozoic and Terreneuvian stratigraphy of the Lena-Anabar Basin and north-western slope of the Olenek Uplift, Siberian Platform. *Precambrian Research*, 2015, vol. 270, pp. 226–245.
20. Grazhdankin D., Maslov A. The room for the Vendian in the Standard Global Chronostratigraphic Chart. *2nd International Congress on Stratigraphy (STRATI 2015)*. Graz, Austria, 19–23 July 2015. pp. 141.
21. Melnikov N.V. *Vend-kembriyskiy solenosny basseyn Sibirskoy platformy (Stratigrafiya, istoriya razvitiya)* [Vendian-Cambrian of the salt basin of the Siberian platform (Stratigraphy, history of development)]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2009. 148 p.
22. *Resheniya chetvertogo Mezhdovedstvennogo regionalnogo stratigraficheskogo soveshchaniya po utocnениyu i dopolneniyu stratigraficheskikh skhem venda i kembriya vnutrennikh rayonov Sibirskoy platformy* [The decisions of the fourth Interdepartmental regional stratigraphic meeting to clarify and supplement the stratigraphic scheme of the Vendian and Cambrian of the inner areas of the Siberian platform]. Novosibirsk, SNIIGiMS Publ., 1989. 64 p.
23. Tumashov I.V. Lithology of the Vendian-Cambrian deposits of the Predyensey oil-and-gas subprovince based on the results of drilling the parametric wells Vostok-1,3,4). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 99–104. In Rus.
24. Folk R.L. Practical petrographic classification of limestone. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, 1959, vol. 43, no. 1, pp. 1–38.
25. Dunham R. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *Bull. Amer. Petrol.*, 1962, Mem. 1, pp. 108–121.
26. Monty C.L.V. Distribution and structure of recent siromalolitic algal mats. Eastern Andros Island, Bahamas. *Ann. Soc. Geol. Belg. Bull.*, 1967, vol. 90, no. 1/3, pp. 55–100.
27. Wilson J.L. *Carbonate Facies in Geologic History*. New York, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1975. 471 p.
28. Burne R.V., Moore L.S. Microbialites: organosedimentary deposits of benthic microbial communities. *Palaos*, 1987, vol. 2. pp. 241–254.
29. Flügel E. *Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application*. Second Edition. Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, 1006 p.
30. Bjorlykke K. Relationships between depositional environments, burial history and rock properties. Some principal aspects of diagenetic process in sedimentary basins. *Sedimentary Geology*, 2014, vol. 301, pp. 1–14.
31. Brigaud B., Vincent B., Durlet C., Deconinck J., Jobard E., Picard N., Yven B., Landrein P. Characterization and origin of permeability-porosity heterogeneity in shallow-marine carbonates: From core scale to 3D reservoir dimension (Middle Jurassic, Paris Basin, France). *Marine and Petroleum Geology*, 2014, vol. 57, pp. 631–651.
32. Thomson D., Rainbird R.H., Dix G. Architecture of a Neoproterozoic intracratonic carbonate ramp succession: Wynniatt Formation, Amundsen Basin, Arctic Canada. *Sedimentary Geology*, 2014, vol. 299, pp. 119–138.
33. Durbano A.M., Pratt B.R., Hadlari T., Dewing K. Sedimentology of an early Cambrian tide-dominated embayment: Quyuq formation, Victoria Island, Arctic Canada. *Sedimentary Geology*, 2015, vol. 320, pp. 1–18.
34. Gao Z., Fan T. Carbonate platform-margin architecture and its influence on Cambrian-Ordovician reef-shoal development, Tarim Basin, NW China. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, vol. 68, pp. 291–306.
35. Bagrintseva K.I. *Karbonatnye porody – kollektory nefi i gaza* [Carbonate rocks are the reservoirs of oil and gas]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 231 p.
36. Isaev G.D., Makarenko S.N., Raaben M.E., Bidzhakov V.I., Koptev I.I. *Geologicheskoe stroenie doyruskogo osnovaniya Zapadno-Sibirskoy plity v predelakh Ket-Tymskogo mezhdurechya* [Geological structure of the pre-Jurassic base of Western Siberian plate within Ket-Tymsk rivers]. Novosibirsk, NSU Publ., 2003. 34 p.

Received: 6 September 2016.

Information about the authors

Igor V. Tumashov, Cand. Sc., junior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and geophysics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Irina V. Varaksina, Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and geophysics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 549.651/549.02

ПОЛЕВОЙ ШПАТ ЩЕЛОЧНО-ГРАНИТНОГО КОМПЛЕКСА ХАЛДЗАН-БУРЭГТЭГ (ЗАПАДНАЯ МОНГОЛИЯ): ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

Зенина Ксения Сергеевна¹,
kszenina@ggf.tsu.ru

Небера Татьяна Степановна¹,
TSNebera@mail.ru

Коноваленко Сергей Иванович¹,
konov@ggf.tsu.ru

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

Состав, структура и другие особенности минералов являются важнейшими генетическими характеристиками, отражающими условия их образования, и позволяют провести реконструкцию жизни геологического объекта. Полевой шпат, в связи с его кристаллизацией в широком интервале температур и давлений, изоморфных замещений и распада твердых растворов, является важным объектом минералогических исследований.

Цель исследования: выявление особенностей структуры и химического состава полевого шпата многофазового щелочно-гранитного комплекса Халдзан-Бурэгтэг в Западной Монголии.

Объект исследования: щелочно-гранитовая формация Озерной зоны Западной Монголии, которая объединяет ряд крупных массивов Халдзан-Бурэгтэгской группы (Улан-Хурэн, Гурван-Унэт, Улан-Унэт, Цогту-Ула, Цохни-Ула, Халдзан-Бурэгтэг) ранне-палеозойского возраста, а также позднемагматические дифференциаты гранитоидов – пегматиты и постмагматические производные – гидротермалиты и метасоматиты.

Предмет исследования: полевой шпат, представленный калиевым полевым шпатом и плагиоклазом.

Методы исследования. Проведено комплексное исследование полевого шпата, включающее оптический и морфологический анализ минерала, рентгеноструктурный, рентгенолюминесцентный, рентгеновский энерго-дисперсионный микроанализ, а также количественный и полуколичественный спектральный анализ.

Результаты. Описана морфология, габитус исследуемого полевого шпата, изучены пертитовые структуры минерала. Определены рентгеноструктурные характеристики калиевого полевого шпата и плагиоклаза. Получены данные о химическом составе полевого шпата комплекса, и составлены кристаллохимические формулы минерала. Установлено, что все рассматриваемые породы комплекса Халдзан-Бурэгтэг (нордмаркиты, щелочные и редкометалльные граниты, пегматиты и метасоматиты) имеют двухполюсовый состав с преобладанием калиевой фазы. Среди калиевого полевого шпата доминирует максимальный микроклин, среди плагиоклазов – низкий альбит. На основе полученных типоморфных характеристик была проведена генетическая типизация калиевого полевого шпата (раннемагматический, позднемагматический, постмагматический), определены температуры кристаллизации пород, оценена эволюция среды минералообразования на объекте. Выявлено, что от более высокотемпературных раннемагматических гранитных фаз к более низкотемпературным позднемагматическим образованиям (пегматитам) и постмагматическим производным (метасоматитам) наблюдается закономерное изменение структурных и химических особенностей полевых шпатов.

Ключевые слова:

Полевой шпат, массив Халдзан-Бурэгтэг, типоморфизм, щелочные граниты, редкометалльные граниты, пегматиты.

Введение

Провинции щелочных гранитоидов относятся к довольно редким природным ассоциациям. Особенно это касается высокощелочных представителей гранитоидов с коэффициентом агпаитности $((K_2O+Na_2O)/Al)$ больше 1,2. В настоящее время во многих странах возрос интерес к агпаитовым гранитам [1–10]. Они рассматриваются как перспективный источник широкого спектра редких металлов и редкоземельных элементов (Ta, Nb, Zr, Y, Be, Li, TR). Их рудная специализация представлена множеством экзотических минералов Nb, Zr, Y и редкоземельных элементов (РЗЭ) (как правило, это ниобийосиликаты, цирконосиликаты и иттрокарбонаты). К таким объектам, содержащим промышленную Zr-Nb-РЗЭ-минерализацию, относится и щелочно-гранитный комплекс Халдзан-Бурэгтэг. Он расположен в пределах Монгольского Алтая, на

левобережье р. Ховд-Гол, в 40 км от ее устья (оз. Хараус-Нур) и включает, согласно В.И. Коваленко с соавторами [11, 12], 7 интрузивных фаз внедрения, в том числе 2 редкометалльные с Zr, Nb, Y и РЗЭ-оруденением. Выделяются следующие группы пород (от ранних фаз к поздним): 1 – нордмаркиты и синхронные с ними долериты; 2 – щелочные граниты и синхронные с ними долериты; 3 – экериты, мелкозернистые щелочные граниты и пегматиты; 4 – пантеллериты; 5 – редкометалльные щелочные граниты; 6 – дайковые калиевые щелочные базиты и, условно, лейкократовые сиениты; 7 – миароловые редкометалльные щелочные граниты. В состав комплекса входят следующие массивы: Улан-Хурэн, Гурван-Унэт, Улан-Унэт, Цогту-Ула, Цохни-Ула, Халдзан-Бурэгтэг [9, 12]. На современной дневной поверхности собственно массив Халдзан-Бурэгтэг представлен двумя

овальными в плане выходами – Южным и Северным. Они отчетливо различаются по внутреннему строению. Наиболее сложным по структуре является Южный выход. Для него характерно концентрически-зональное строение и присутствие всех семи фаз внедрения. Северный выход обнаруживает простое линейное строение и сложен преимущественно нордмаркитами I фазы внедрения. Редкометалльные щелочные граниты поздних фаз в нем не обнаружены [13].

Минеральный кадастр массива сегодня представлен 125 минеральными видами [14]. 65 минеральных видов приходится на пегматиты [15]. К минералам, характерным для всех семи фаз внедрения, а также позднемагматических дифференциатов (пегматитов) и постмагматических производных (гидротермалитов и метасоматитов), относятся кварц, полевой шпат, циркон, щелочной амфибол.

Материалы и методы исследования

Для исследования были взяты образцы из различных гранитных фаз комплекса, сопровождающих их пегматитов и метасоматитов. Каждый образец был разделен на две части. Одна часть была измельчена для выделения монофракций, а из другой части были изготовлены шлифы для оптической диагностики минералов. Оптическая диагностика и микрофотосъемка полевого шпата проводилась на оптическом поляризационном микроскопе Leica DM2500P (К.С. Зенина).

Для аналитических исследований был проведен отбор монофракций полевого шпата по цветовым и кристаллографическим характеристикам при помощи стереомикроскопа фирмы Leica ES2 (К.С. Зенина). Размер фракций варьировал от 0,1 мм в гранитах до 1,0 мм в пегматитах и метасоматитах. Наиболее затруднительный отбор монофракций был связан с неоднородностью полевого шпата гранитных фаз. Полностью разделить калиевый полевой шпат, плагиоклаз и пертитизированные разности на отдельные монофракции не удалось. В протолочке проб гранитных фаз были выделены по морфологическим и цветовым характеристикам отдельные зерна полевого шпата и продиагностированы при помощи рентгеновского энерго-дисперсионного микроанализа (РЭМА), интегрированного с электронным микроскопом VEGA II LMU (аналитики О.В. Бухарова, А.А. Пешков, центр коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем», далее ЦКП «АЦГПС»). Следующим этапом был отбор монофракций разделенных по РСМА фаз полевого шпата. Количество монофракций для РЭМА составило 52, навеска проб – 100 мг. Съемка произведена на рентгеновском дифрактометре X' PERT PRO (фирма Panalytical) (аналитик Т.С. Небера, ЦКП «АЦГПС»). Обработка дифрактограмм осуществлялась с помощью программного обеспечения High Score. Часть проб, подвергшихся сомнению по чистоте, прошли процесс гомогенизации.

Отжиг проводился в муфельной печи в алундовых тиглях. Температура обработки – 1000 °С, время – 48 часов (М.А. Самохвалов, ЦКП «АЦГПС»). Повторно снятые дифрактограммы полевого шпата показали полную гомогенизацию и дали информацию об их структурном состоянии на стадии завершения кристаллизации, но до начала распада твердого полевошпатового раствора. Расчет рентгенографических характеристик производился согласно стандартной рентгеновской методике [16]. Контроль рентгенографических данных осуществлялся по оптическим данным. Температуры образования калиевого полевого шпата определялись по моноклинной упорядоченности [17, 18] и по двуполевошпатовому термометру [19].

Спектр и содержание примесных элементов выявлен количественным и полуколичественным спектральным анализом (аналитик Е.Д. Агапова, ЦКП «АЦГПС»).

Описание полевых шпатов

Большинство горных пород, слагающих комплекс, имеют двуполевошпатовый состав и характеризуются резким преобладанием калиевого полевого шпата (КПШ) над плагиоклазом, доля которого составляет первые %. Объем породообразующего плагиоклаза возрастает от раннемагматических к позднемагматическим комплексам, а максимальное значение К-Na-полевые шпаты приобретают в постмагматических производных, где на долю плагиоклаза приходится до 60 % от общего объема породы. В гранитах плагиоклаз помимо пертитовых структур распада замещает краевые участки зерен КПШ. Центральные части зерен в большинстве своем остаются свежими. Минералы, слагающие редкометалльные фазы комплекса, значительно корродированы лейстовидным альбитом, но пертиты распада являются в них исключительной редкостью. Состав шлировых и жильных пегматитов комплекса [15] – кварц-микроклинный, доля плагиоклаза в них минимальна. В шлировых пегматитах практически весь альбит представлен пертитовыми ламелями. Процессы замещения КПШ плагиоклазом редки и связаны с сегрегированностью пертитов. В зональных пегматитах помимо плагиоклаза пертитовых вростков встречается постмагматический альбит замещающих комплексов. Наиболее распространен плагиоклаз в постмагматических образованиях, представленных разнообразными по составу и морфологии метасоматитами, где он замещает первичные породообразующие минералы исходного субстрата. Кислый плагиоклаз является главным породообразующим минералом ранней щелочной стадии формирования метасоматитов участка Цахирин (Северный выход). Он развивается в замещаемых породах в виде агрегата белых лейстовидных зерен размером 2–7 мм, обычно полисинтетически двойникованных по альбитовому закону и находящихся в тесном сростании с кварцем [20]. Процессы альбитизации широко представлены и на Южном вы-

ходе, где установлено самое крупное тело альбититов с поперечным размером до 1 км. Процессы альбитизации широко проявлены и в щелочных гранитах, в ходе чего формируются тела неправильной формы без четких геологических границ (Северный выход). В постмагматических комплексах КППШ представлен реликтовыми зернами первично-магматического происхождения, реже он образует ксеноморфно-зернистые агрегаты на стадии поздней метасоматической микроклинизации, наиболее широко проявленной на участке Халдзан-Бурэгтэг (Южном выход) и в аподолеритовых метасоматитах участка Цахирын (Северный выход). На участке Халдзан-Бурэгтэг в метасоматически изменённых щелочных гранитах лейсты альбита в виде пойкилитовых включений присутствуют не только в КППШ, но и в кварце, эгирине и ферроферри-фтор-ликите (амфибол).

Окраска, размеры и форма выделений и кристаллов полевого шпата заметно различаются от одной фазы комплекса к другой. Для пегматитов характерны кристаллы двух типов – карлсбадского, когда индивиды вытянуты по оси c с гранями m (110), b (010), c (001), y (201), x ($\bar{1}01$), a (100) и n (130), и реже бавенского с кристаллами, вытянутыми по оси a , с примерно равным развитием граней c (001), b (010), m (110), y (201), x ($\bar{1}01$) и e (021). В блоковых зонах пегматитовых тел встречаются единичные кристаллы КППШ адулярового облика в виде призматических индивидов с основной гранью m (110) и гранями x ($\bar{1}01$), c (001), y (201), b (010) и e (021). В гранитах преобладает КППШ бавенского типа. Размеры минерала варьируют от 0,1–0,4 мм в нордмаркитах и 0,5–15 мм в щелочных гранитах до 20–35 см по удлинению в пегматитах комплекса. В этом же направлении меняется и окраска КППШ – от красной до розовой молочно-белой. Для плагиоклаза характерны изометричные формы кристаллов с гранями c (001), b (010), m (010), M (010) и e (021).

Микроскопически КППШ представлен пертитизированными разностями (рис. 1). Согласно классификации С.А. Руденко [21], выделено три типа пертитов: пертиты распада, характерные для большинства гранитных пород и пегматитов, пертиты замещения и метасоматические пертиты 2-го рода, обнаруженные в метасоматитах и в пегматитовой жиле «Псевдоморфозная». Пертиты распада отличаются большим разнообразием. Они представлены прожилковыми, прожилково-струйчатыми, реже микропрожилковыми и пятнисто-струйчатыми разностями. Вероятно, в ряде случаев они формируются с участием процессов замещения (рис. 1, в, з), что отображается и в завышенных температурах образования, определенных по двуполевошпатовому термометру после их гомогенизации (табл. 1, пробы ХБ-102, ХБ-5-403, ХБ-5-211). Метасоматические пертиты 2-го рода имеют шнуровидную и пятнисто-струйчатую форму с расплывчатыми границами между зернами альбита. По размерности большая часть пертитов относится к крупным и средним микроперти-

там. В редкометалльных гранитах пертиты устанавливаются только по РСА и РЭМА и относятся к субкриптопертитам. Блоковый КППШ пегматитовых жил Северного выхода характеризуется единичными находками макропертитов с размерами вростков плагиоклаза до 0,3 мм. Пертитовые ламели слагают от 20 до 40 % площади зерна. Угол погасания пертитов в плоскости (010) равен 16° – 18° , что соответствует чистому альбиту. Оптические показатели относительно состава пертитовых ламелей согласуются и с данными РЭМА (табл. 2).

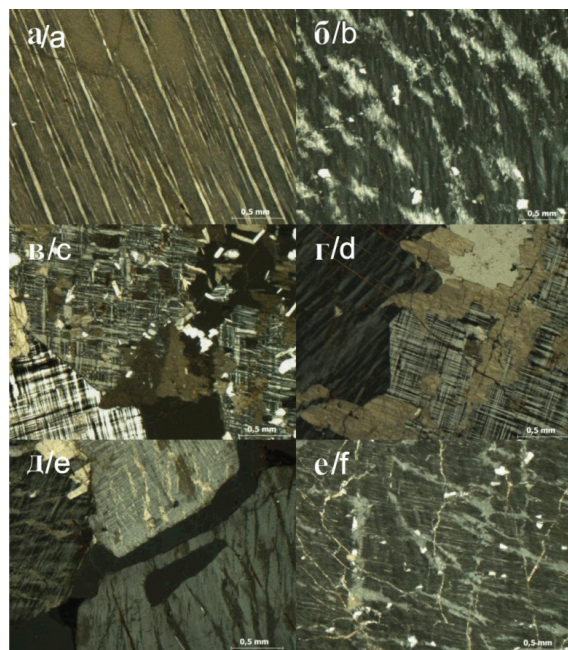


Рис. 1. Пертитовые структуры КППШ Халдзан-Бурэгтэгского комплекса (никили скрещены): а – прожилковые пертиты распада КППШ ядерной зоны пегматитовой жилы «Пологая» (ХБ-5-44) Северного выхода; б – метасоматические пертиты 2-го рода пятнисто-струйчатой формы с расплывчатыми границами зерен альбита в КППШ пегматитовой жилы «Псевдоморфозная» (ХБ-5-85) Северного выхода; в, г – микроклиновая решетка, микропрожилковые структуры распада и структуры замещения КППШ пегматитов участка Цахирын (ХБ-5-403, ХБ-5-211); д – микропрожилковые и пятнисто-струйчатые пертиты КППШ эгиринового пегматита (ХБ-4-27) Северного выхода; е – прожилково-струйчатые пертиты распада КППШ пегматитовой жилы «Большая» (ХБ-5-16) Южного выхода

Fig. 1. Perthite structures of potassium feldspar (K-feldspar) of the complex Khaldzan-Buregteg. Crossed Nicole. Note: a are the veined perthite of K-feldspar decay of nuclear zone of the pegmatite vein «Pologaya» (KhB-5-44), North exit; b are the metasomatic perthite of the 2nd sort of spotted-wavy shape with indistinct albite grain boundaries in K-feldspar of pegmatitic vein «Pseudomorphoznaya» (KhB-5-85), North exit; c, d is the microcline lattice, micro-veined structures of decay and structures of replacement of K-feldspar pegmatites of the zone Tsakhirin (KhB-5-403, KhB-5-211); e are the micro-veined and spotted-wavy perthite of K-feldspar from aegirine pegmatite (KhB-4-27), North exit; f are the vein-wavy perthite of decay of K-feldspar from core zone of the pegmatite vein «Bolshaya» (KhB-5-16), South exit

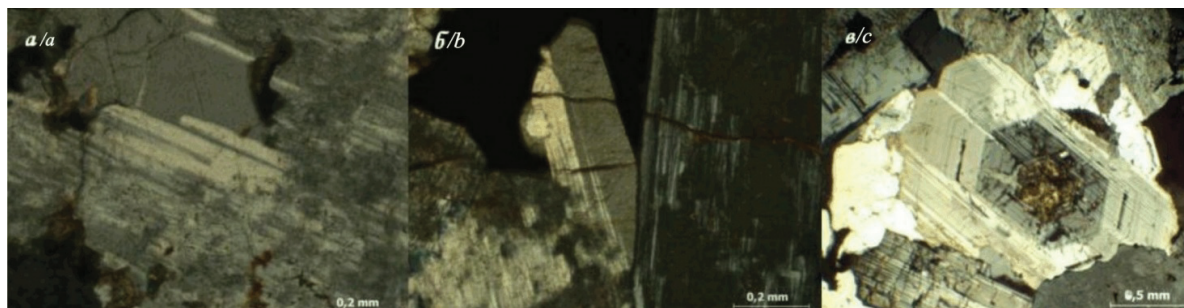


Рис. 2. Оптическое исследование плагиоклаза: а – раскисленный плагиоклаз; б – свежий плагиоклаз; в – зональное изменение плагиоклаза

Fig. 2. Optical study of plagioclase. Note: a is the deoxidized plagioclase; b is the unmodified plagioclase; c is the zone change of plagioclase

Внепертитовый плагиоклаз идиоморфен обладает полисинтетическим двойникованием, угол погасания (15° – 17°) в плоскости (010) соответствует альбиту. В постмагматических образованиях наблюдается значительно сосюритизированный и раскисленный плагиоклаз (рис. 2, а). Меньшая доля приходится на свежий плагиоклаз (рис. 2, б). В альбитизированных щелочных гранитах плагиоклаз часто зональный с сосюритизированной центральной зоной (рис. 2, в). В метасоматитах сосюритизации и раскислению подвержены краевые части зерен, центральная часть при этом хорошей сохранности.

Результаты исследования полевых шпатов

Рентгенографическая характеристика и состав каликатровых полевых шпатов щелочно-гранитного комплекса Халдзан-Бурэгтэг представлены в табл. 1. По распределению Al в кремнекислородных тетраэдрах t_1 и t_m рассматриваемые КППШ, относящиеся к разным фазам внедрения щелочных гранитоидов, заметных отличий не имеют. Большинство проанализированных проб КППШ фаз Северного и Южного выходов относятся к максимальным микроклинам ($0,89 < \Delta t_1 < 1,01$). Промежуточные микроклины характерны только для южного выхода, а именно для редкометалльных гранитов и пегматитов мелких жил гребня ($0,41 < \Delta t_1 < 0,78$). По методу «трех пиков» [22, 23], когда рефлекс 201 определяет состав, а рефлекс 060 и 204 – упорядоченность, а также по номограмме для расчёта разницы содержания алюминия в позициях t_1 и t_m в зависимости от $\Delta 2\theta$ по рефлексам 131 и 131 [23], исследованные КППШ отнесены к микроклинам.

Методами РСА и РЭМА был определен состав калиевой фазы в КППШ-пертитах. Наиболее обогащён изоморфной примесью Na калиевый полевой шпат из пород Южного выхода (Ab до 11,46 % по РЭМА). В целом содержания Ab % сильно варьируют от пробы к пробе, особенно в щелочных гранитах и нордмаркитах – от 1,75 до 9,14. Состав большинства проб анализируемого КППШ следующий: $Or_{97,12-97,95}Ab_{2,03-2,88}$.

Температуры, определенные по моноклинной упорядоченности и по двуполевошпатовому термометру, отличаются в среднем на 50 – $70^{\circ}C$. По двуполевошпатовому термометру для нордмаркитов температура образования находится в интервале 300 – $470^{\circ}C$, для щелочных гранитов – 250 – $700^{\circ}C$, для редкометалльных гранитоидов характерен узкий диапазон температур, составляющий 380 – $400^{\circ}C$, для поздне- и постмагматических образований температура широко варьирует – от 200 до $500^{\circ}C$, и в среднем составляет $400^{\circ}C$. По моноклинной упорядоченности температуры значительно ниже. Для нордмаркитов – 330 – $400^{\circ}C$, для щелочных гранитов – 180 – $400^{\circ}C$, для редкометалльных фаз – 300 – $330^{\circ}C$, для пегматитов – от 180 до $380^{\circ}C$, температура образования метасоматитов составляет 300 – $330^{\circ}C$.

Анализ соотношений Ab-составляющей и содержания K в КППШ (рис. 3) показал, что при переходе от более высокотемпературных раннемагматических гранитов и нордмаркитов к позднемагматическим пегматитам, которые формируются при относительно более низких температурах, доля Ab-составляющей заметно сокращается. Краевая и ядерная зоны пегматитовых тел обнаруживают узкий диапазон концентраций Na при относительно одинаковом содержании калиевой составляющей (13–14 мас. %). В то же время в блоковых КППШ наблюдается широкая вариация доли Ab (от 2,05 до 8,83 %) и ее обратная зависимость от содержания калия.

Формульный состав КППШ заметно отличается от теоретического дефицитом щелочной относительно содержания кремния и алюминия и отсутствием кальция, за исключением одной пробы КППШ нордмаркитов Северного выхода.

Кристаллохимические формулы калиевых полевых шпатов в породах комплекса следующие: нордмаркиты ЮВ ($K_{0,97}Na_{0,02}Al_{0,99}Fe_{0,01}Si_{3,02}O_8$); нордмаркиты СВ ($K_{1,00}Na_{0,02}Ca_{0,01}Al_{1,03}Si_{2,94}O_8$); щелочные граниты ЮВ ($K_{0,87}Na_{0,07}Al_{0,98}Si_{3,08}O_8$); щелочные граниты СВ ($K_{0,66}Na_{0,31}Al_{0,97}Fe_{0,02}Si_{3,02}O_8$); редкометалльные граниты ЮВ ($K_{0,74}Na_{0,10}Al_{0,84}Si_{3,22}O_8$); пегматиты ЮВ ($K_{0,98}Na_{0,01}Al_{0,97}Fe_{0,01}Si_{3,01}O_8$); пегматиты СВ ($K_{0,99}Na_{0,02}Al_{1,01}Fe_{0,03}Si_{3,01}O_8$); метасоматиты ($K_{0,97}Na_{0,02}Al_{0,99}Fe_{0,03}Si_{3,01}O_8$).

Таблица 1. Рентгенографическая характеристика и кристаллохимический состав калинатовых полевых шпатов щелочно-гранитного комплекса Халдзан-Бурэгтэг
Table 1. X-ray characteristic and crystal-chemical composition of K-Na feldspars of alkali-granite complex Khaldzan-Buregteg

Порода /Rock	Выход Bld%	№ пробы/Sample	2V Np	060	Z04	Z01	130	130	Al	Σti	Δti	Or %	Состав/Composition		Температура/Temperature, t, °C	
													Рент./X-ray	Эп. микроскоп/Electron microscopy	1	2
Нордмаркиты Nordmarkites	C (N)	ХБ-5-55 Гомогенизация Homogenization (Г)	81-82	41,81	50,54	21,07	23,55	23,97	0,94	0,05	0,01	89,33	Or _{83,37} Ab _{16,67}	Or _{83,48} Ab _{16,52} Ar _{0,48}	380	330
		ХБ-5-93	83	41,87	50,65	21,16	23,37	24,11	0,94	0,01	0,03	81,03	Or _{81,03} Ab _{18,97}	Or _{81,03} Ab _{18,97}	300	–
		ХБ-5-94	83	41,82	50,57	21,13	23,32	24,08	0,96	0,01	0,02	83,80	Or _{83,87} Ab _{16,13}	Or _{83,87} Ab _{16,13}	470	400
Щелочные граниты Alkaline granites	Ю (S)	ХБ-5-95	84	41,85	50,56	21,11	23,35	24,09	0,96	0,04	0,00	85,64	Or _{85,64} Ab _{14,36}	Or _{85,64} Ab _{14,36}	450	400
		ХБ-5-33	84	41,82	50,52	21,03	23,21	24,01	1,00	0,01	0,00	93,01	Or _{93,01} Ab _{6,99}	Or _{93,01} Ab _{6,99}	430	380
		Г	–	41,75	50,69	21,17	23,32	24,09	–	–	–	79,80	Or _{79,80} Ab _{20,20}	Or _{79,80} Ab _{20,20}	310	250
С (N)	С (N)	ХБ-5-70	83	41,91	50,65	21,16	23,37	24,09	0,94	0,03	0,02	81,03	Or _{81,03} Ab _{18,97}	Or _{81,03} Ab _{18,97}	490	410
		Г	–	42,02	50,74	21,51	23,57	24,18	–	–	–	48,61	Or _{48,61} Ab _{51,39}	Or _{48,61} Ab _{51,39}	470	400
		ХБ-5-72a	82-83	41,88	50,59	21,01	23,21	23,99	0,98	0,02	0,00	94,86	Or _{94,86} Ab _{5,14}	Or _{94,86} Ab _{5,14}	700	–
Ю (S)	Ю (S)	Г	–	41,83	50,56	21,12	23,25	24,05	–	–	–	84,66	Or _{84,66} Ab _{15,34}	Or _{84,66} Ab _{15,34}	250	180
		ХБ-5-72b	82-83	41,89	50,60	21,11	23,32	24,09	0,98	0,02	0,00	85,64	Or _{85,64} Ab _{14,36}	Or _{85,64} Ab _{14,36}	440	400
		Г	–	41,89	50,71	21,15	23,34	24,08	–	–	–	82,24	Or _{82,24} Ab _{17,76}	Or _{82,24} Ab _{17,76}	430	380
Редкометалльные граниты 7-й фазы Rare-metal alkaline granites 7 th phase	Ю (S)	ХБ-5-92	84	41,9	50,66	21,08	23,37	24,09	0,92	0,03	0,02	88,40	Or _{88,40} Ab _{11,60}	Or _{88,40} Ab _{11,60}	460	400
		Г	–	41,92	50,85	21,58	23,54	24,05	–	–	–	42,44	Or _{42,44} Ab _{57,56}	Or _{42,44} Ab _{57,56}	400	330
		ХБ-5-99	81	41,9	50,75	21,11	23,32	24,02	0,88	0,01	0,06	85,64	Or _{85,64} Ab _{14,36}	Or _{85,64} Ab _{14,36}	720	–
Редкометалльные граниты 5-й фазы Rare-metal alkaline granites 5 th phase	Ю (S)	ХБ-ПГ-1	81	41,95	50,76	21,10	23,61	24,02	0,71	0,20	0,04	86,56	Or _{86,56} Ab _{13,44}	Or _{86,56} Ab _{13,44}	430	380
		ХБ-ПГ-2	81	41,87	50,60	21,09	23,59	24,08	0,79	0,19	0,01	87,48	Or _{87,48} Ab _{12,52}	Or _{87,48} Ab _{12,52}	410	330
		ХБ-ПГ-3	80	42,00	50,86	21,06	23,55	24,08	0,76	0,11	0,07	90,25	Or _{90,25} Ab _{9,75}	Or _{90,25} Ab _{9,75}	400	330
Редкометалльные граниты 7-й фазы Rare-metal alkaline granites 7 th phase	Ю (S)	ХБ-ПГ-6	80	41,92	50,72	21,08	23,71	24,10	0,70	0,22	0,04	88,40	Or _{88,40} Ab _{11,60}	Or _{88,40} Ab _{11,60}	380	350
		ХБ-ПГ-8	84	41,88	50,85	21,08	23,64	24,03	0,64	0,15	0,10	88,40	Or _{88,40} Ab _{11,60}	Or _{88,40} Ab _{11,60}	400	330
		ХБ-5-42	84	41,78	50,50	21,02	23,21	23,98	0,97	0,02	0,00	93,94	Or _{93,94} Ab _{6,06}	Or _{93,94} Ab _{6,06}	400	330
Жила «Пологая» Vein «Pologaya»	Краявая зона Boundary zone	Г	–	41,81	50,65	21,24	23,34	24,04	–	–	–	73,65	Or _{73,65} Ab _{26,35}	Or _{73,65} Ab _{26,35}	300	250
		ХБ-5-43	84	41,80	50,52	21,02	23,22	23,99	0,97	0,02	0,00	93,94	Or _{93,94} Ab _{6,06}	Or _{93,94} Ab _{6,06}	570	–
		Г	–	41,80	50,66	21,25	23,35	24,04	–	–	–	72,62	Or _{72,62} Ab _{27,38}	Or _{72,62} Ab _{27,38}	300	250
Жила «Точка наблюдения 491» Vein «Point observations 491»	Ядерная зона Core zone	ХБ-5-44	83	41,83	50,56	21,06	23,25	24,04	0,98	0,00	0,01	90,25	Or _{90,25} Ab _{9,75}	Or _{90,25} Ab _{9,75}	380	330
		Г	–	41,80	50,61	21,19	23,30	24,07	–	–	–	78,26	Or _{78,26} Ab _{21,74}	Or _{78,26} Ab _{21,74}	500	–
		ХБ-5-36	82	41,83	50,58	21,05	23,27	23,99	0,93	0,04	0,02	91,17	Or _{91,17} Ab _{8,83}	Or _{91,17} Ab _{8,83}	330	300
Жила «Точка наблюдения 499» Vein «Point observations 499»	Краявая зона Boundary zone	Г	–	41,79	50,61	21,05	23,30	23,96	–	–	–	91,17	Or _{91,17} Ab _{8,83}	Or _{91,17} Ab _{8,83}	330	–
		ХБ-5-35	–	41,85	50,55	21,06	23,26	24,05	0,99	0,01	0,00	90,25	Or _{90,25} Ab _{9,75}	Or _{90,25} Ab _{9,75}	380	330
		ХБ-5-77	–	41,86	50,58	21,09	23,29	24,05	0,97	0,02	0,01	87,48	Or _{87,48} Ab _{12,52}	Or _{87,48} Ab _{12,52}	400	330
Пегматит Цахирина Pegmatites of the zone Tsakhirin	Пегматит Pegmatoid	ХБ-5-79	–	41,81	50,54	21,04	23,25	23,99	0,95	0,04	0,01	92,09	Or _{92,09} Ab _{7,91}	Or _{92,09} Ab _{7,91}	350	300
		Г	–	41,85	50,64	21,24	23,33	23,95	–	–	–	73,83	Or _{73,83} Ab _{26,17}	Or _{73,83} Ab _{26,17}	510	–
		ХБ-5-403	84	41,8	50,52	21,03	23,22	23,99	0,97	0,02	0,00	93,01	Or _{93,01} Ab _{6,99}	Or _{93,01} Ab _{6,99}	340	300
Пегматит Цахирина Pegmatites of the zone Tsakhirin	Пегматит Pegmatoid	Г	–	41,91	50,94	21,48	23,69	24,15	–	–	–	51,10	Or _{51,10} Ab _{48,90}	Or _{51,10} Ab _{48,90}	680	–
		ХБ-5-211	80	41,83	50,54	21,05	23,23	24,03	0,99	0,01	0,00	91,17	Or _{91,17} Ab _{8,83}	Or _{91,17} Ab _{8,83}	330	300
		Г	–	41,77	50,66	21,18	23,63	24,02	–	–	–	78,86	Or _{78,86} Ab _{21,14}	Or _{78,86} Ab _{21,14}	510	–

Окончание табл. 1
Table 1

Порода / Rock		Exit	№ пробы / Sample	2V Np	060	Z04	Z01	130	130	Al			Σti	Or %	Состав / Composition		Температура / Temperature, t, °C	
										t0	tm	t0-tm			Рентг. / X-ray	Эп. микроскоп / Electron microscopy	1	2
Пегматиты / Pegmatites	Жила «Большая» Vein «Bolsheya»	Ядерная зона Core zone	84	41,84	50,54	21,06	23,25	24,04	0,99	0,01	0,00	1,01	0,98	90,25	Or _{90,25} Ab _{9,75}	Or _{91,17} Ab _{8,87}	380	330
			82	41,82	50,52	21,04	23,21	24,02	1,01	0,00	0,00	1,01	0,92,09	Or _{92,09} Ab _{7,91}	Or _{98,2} Ab _{1,77}	350	300	
	Жила «Псевдоморфозная» Vein «Pseudomorphs»	Краявая зона Boundary zone	Г	–	41,80	50,64	21,16	23,30	24,01	–	–	–	81,08	Or _{81,08} Ab _{18,92}	–	470	–	
			–	41,83	50,54	21,06	23,25	24,04	0,99	0,01	0,00	1,00	0,98	90,25	Or _{90,25} Ab _{9,75}	Or _{93,99} Ab _{6,10}	380	330
		Блоковая зона Block zone	Г	–	41,82	50,61	21,20	23,29	24,05	–	–	–	77,56	Or _{77,56} Ab _{22,44}	–	500	–	
			82-83	41,81	50,53	21,03	23,22	24,02	0,99	0,00	0,00	0,99	0,99	93,01	Or _{93,01} Ab _{6,99}	Or _{91,17} Ab _{8,87}	310	250
		Краявая зона Boundary zone	Г	–	41,73	50,84	21,19	23,28	23,55	–	–	–	78,13	Or _{78,13} Ab _{21,87}	–	500	–	
			–	41,82	50,54	21,05	23,23	24,02	0,99	0,01	0,00	0,99	0,98	91,17	Or _{91,17} Ab _{8,83}	Or _{93,09} Ab _{7,91}	330	250
	Жила «Классическая» Vein «Classic»	Псевдоморфозы краевой зоны Pseudomorphs boundary zone	Г	–	41,86	50,58	21,10	23,30	24,03	–	–	–	86,40	Or _{86,40} Ab _{13,60}	–	410	–	
			–	41,81	50,52	21,03	23,21	24,00	0,99	0,01	0,00	1,00	0,98	93,01	Or _{93,01} Ab _{6,99}	Or _{94,55} Ab _{5,44}	310	250
		Блоковая зона Block zone	Г	–	41,65	50,92	21,23	23,54	24,05	–	–	–	–	74,17	Or _{74,17} Ab _{25,83}	–	520	–
			83-84	41,78	50,49	20,99	23,18	23,98	0,99	0,01	0,00	1,00	0,98	96,70	Or _{96,70} Ab _{3,30}	Or _{96,70} Ab _{3,33}	200	180
		Графическая зона Graphic zone	84	41,79	50,5	21,02	23,12	23,94	1,01	0,00	0,00	1,00	1,01	93,94	Or _{93,94} Ab _{6,06}	Or _{91,17} Ab _{8,82}	300	250
			Г	–	41,97	50,70	21,51	23,55	24,15	–	–	–	–	48,89	Or _{48,89} Ab _{51,11}	–	700	–
		Пегматит с эгирином Pegmatite with aegirine	81-82	41,83	50,56	21,06	23,27	24,03	0,96	0,02	0,01	0,98	0,94	90,25	Or _{90,25} Ab _{9,75}	Or _{91,74} Ab _{7,99}	380	330
			Г	–	41,87	50,82	21,32	23,35	24,08	–	–	–	–	66,72	Or _{66,72} Ab _{33,28}	–	580	–
	Блоковая зона Block zone	–	41,82	50,53	21,07	23,24	24,01	0,98	0,02	0,00	1,00	0,95	89,33	Or _{89,33} Ab _{10,67}	Or _{91,97} Ab _{8,83}	400	350	
		–	41,82	50,54	21,05	23,23	24,02	0,99	0,01	0,00	0,99	0,98	91,17	Or _{91,17} Ab _{8,83}	Or _{94,46} Ab _{5,34}	330	300	
	Жила «Большая» Vein «Bolsheya»	Ядерная зона Core zone	–	41,64	50,89	21,25	23,01	23,63	–	–	–	–	72,40	Or _{72,40} Ab _{27,60}	–	575	–	
			81	41,80	50,51	21,03	23,23	24,01	0,98	0,02	0,00	1,00	0,96	93,01	Or _{93,01} Ab _{6,99}	Or _{92,09} Ab _{7,90}	310	250
		Ядерная зона с псевдоморфозой Core zone with pseudomorphs	Г	–	41,83	50,56	21,04	23,26	24,04	–	–	–	–	91,83	Or _{91,83} Ab _{8,17}	–	325	–
			80-81	41,73	50,50	20,95	23,21	23,85	0,87	0,09	0,02	0,96	0,78	99,47	Or _{99,47} Ab _{0,53}	Or _{91,67} Ab _{7,99}	200	150
		Пегматит мелких жил гребня Pegmatites of small veins of comb	Г	–	41,92	50,71	21,43	23,48	24,12	–	–	–	–	56,05	Or ₄₄ Ab _{43,95}	–	650	–
			84	41,83	50,54	21,05	23,27	24,04	1,00	0,00	0,00	1,00	1,00	91,17	Or _{91,17} Ab _{8,83}	Or _{91,17} Ab _{7,88}	330	300
		Эгиринитовый пегматит Aegirine pegmatite	Г	–	41,83	50,56	21,04	23,26	24,04	–	–	–	–	91,83	Or _{91,83} Ab _{8,17}	–	325	–
			82	41,82	50,53	21,06	23,24	24,02	0,98	0,02	0,00	1,00	0,97	90,25	Or _{90,25} Ab _{9,75}	Or _{93,99} Ab _{6,33}	380	330
		Блоковая зона Block zone	Г	–	41,87	50,60	21,24	23,31	24,09	–	–	–	–	73,30	Or _{73,30} Ab _{26,70}	–	570	–
			–	41,85	50,57	21,08	23,29	24,02	0,95	0,04	0,00	0,99	0,91	88,40	Or _{88,40} Ab _{11,60}	Or _{91,97} Ab _{8,75}	400	330
	Метасоматиты / Metasomatites		81-82	41,86	50,56	21,10	23,24	24,04	1,00	0,01	0,00	1,01	1,00	86,56	Or _{86,56} Ab _{13,44}	–	410	330
			–	41,86	50,6	21,08	23,31	24,03	0,93	0,04	0,01	0,97	0,89	88,40	Or _{88,40} Ab _{11,60}	Or _{91,74} Ab _{7,99}	400	300

Примечание: 1 – по двухполюсоватому термометру; 2 – по моноклинической упорядоченности; Ю – Южный выход массива; С – Северный выход массива.
Note: 1 – for two-feldspar thermometer; 2 – monoclinic order; S is the South exit of the massif; N is the Northern exit of the massif.

Таблица 2. Химический состав репрезентативных проб калиевого полевого шпата комплекса Халдзан-Бурэгтэг
Table 2. Chemical composition of representative samples of potassium feldspar of the complex Khaldzan-Buregteg

Порода, фаза Rock, phase	Нордмаркиты Nordmarkites			Щелочные граниты Alkaline granites			РЩГ rare-metal alkaline granites		Пегматиты/Pegmatites							
							5-я фаза 5 phase	7-я фаза 7 phase								
Выход/Exit	Ю (S)		С (N)	С (N)		Ю (S)	Ю (S)		С (N)						Ю (S)	
№ пробы Sample	ХБ-5-93	ХБ-5-94	ХБ-5-55	ХБ-5-23	ХБ-5-92	ХБ-РГ-1	ХБ-РГ-6		ХБ-5-43	ХБ-5-44	ХБ-5-36	ХБ-5-102	ХБ-4-16			
Спектр Spectrum	Cn1	Cn1	Cn2	Cn1	Cn3	Cn2	Cn1	Cn1	Cn1	Cn2	Cn1	Cn2	Cn1	Cn2	Cn1	Cn1
Тип/Type	КПШ potassium feldspar	КПШ potassium feldspar	КПШ potassium feldspar	КПШ potassium feldspar	Пертиты Perthites	КПШ potassium feldspar	КПШ potassium feldspar	КПШ potassium feldspar	КПШ potassium feldspar	Пертиты Perthites	КПШ potassium feldspar	Пертиты Perthites	КПШ potassium feldspar	Пертиты Perthites	КПШ potassium feldspar	КПШ potassium feldspar
SiO ₂ (wt. %)	63,85	63,06	65,45	73,35	70,53	64,41	71,1	75,1	65,74	68,29	64,42	68,89	63,88	65,58	65,2	63,63
Al ₂ O ₃	17,62	16,53	19,44	20,55	19,63	17,44	18,75	18,75	17,92	18,45	17,05	18,61	17,7	17,92	16,3	17,76
FeO	0,27	1,81	0,00	0,55	0,32	0,00	0,00	0,00	0,56	0,84	0,77	0,7	0,00	0,37	0,55	0,00
CaO	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na ₂ O	0,2	0,69	0,24	3,88	11,24	0,79	0,88	1,16	0,23	10,08	0,47	11,31	0,25	10,38	0,24	0,32
K ₂ O	16,11	15,48	17,45	12,55	0,17	14,25	13,05	13,59	16,66	0,27	16,22	0,27	16,75	0,00	14,89	16,36
Сумма/Total	98,05	97,57	85,225	110,88	101,89	82,635	90,73	95,01	101,11	97,93	98,93	99,51	98,58	94,25	97,18	98,07
Количество катионов рассчитано на 8 атомов кислорода/Number of cations is calculated on 8 oxygen atoms																
Si	3,02	3,00	2,94	3,02	3,04	3,08	3,19	3,22	3,02	3,09	3,02	3,03	3,00	3,06	3,13	3,00
Al	0,98	0,93	1,03	0,99	1,00	0,98	0,99	0,94	0,97	0,98	0,94	0,96	0,98	0,98	0,92	0,99
Fe	0,01	0,07	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03	0,03	0,03	0,00	0,01	0,02	0,00
Ca	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,02	0,06	0,02	0,31	0,94	0,07	0,08	0,10	0,02	0,88	0,04	0,96	0,02	0,94	0,02	0,03
K	0,97	0,94	1,00	0,66	0,01	0,87	0,75	0,74	0,98	0,02	0,97	0,02	1,00	0,00	0,91	0,98
Катионы Cations	5															
Ап-минал	0,00	0,00	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Аб-минал	1,85	6,33	2,03	31,91	99,01	7,75	9,28	11,46	2,05	98,26	4,21	98,45	2,21	100,00	2,39	2,88
Ог-минал	98,15	93,67	97,48	68,09	0,99	92,25	90,72	88,54	97,95	1,74	95,79	1,55	97,79	0,00	97,61	97,12
Состав Composition	Or _{98,15} Ab _{1,85}	Or _{93,67} Ab _{6,33}	Or _{97,48} Ab _{2,03} An _{0,49}	Or _{68,09} Ab _{31,91}	Ab _{99,01} Or _{0,99}	Or _{92,25} Ab _{7,75}	Or _{90,72} Ab _{9,28}	Or _{88,54} Ab _{11,46}	Or _{97,95} Ab _{2,05}	Ab _{98,26} Or _{1,74}	Or _{95,79} Ab _{4,21}	Ab _{98,45} Or _{1,55}	Or _{97,79} Ab _{2,21}	Ab _{100,00} Or _{0,00}	Or _{97,61} Ab _{2,39}	Or _{97,12} Ab _{2,88}

Примечание: Ю – южный выход массива; С – северный выход массива

Note: S is the South exit of the massif; N is the Northern exit of the massif.

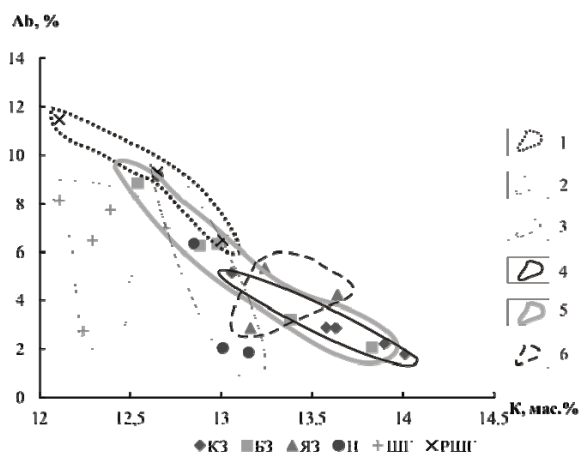


Рис. 3. Соотношение содержаний К- и Аб-составляющей в КПШ: 1 – область редкометалльных щелочных гранитов (РЩГ); 2 – область щелочных гранитов (ЩГ); 3 – область нордмаркитов (Н); 4–6 – зональные жилы пегматитов: 4 – краевая зона (КЗ); 5 – блоковая зона (БЗ); 6 – ядерная зона (ЯЗ)

Fig. 3. Ratio of K and Ab component contents in K-feldspar. Note: 1 is the area of rare-metal alkaline granites; 2 is the area of alkaline granites; 3 is the area of nordmarkite; 4–6 are the zonal veins of pegmatites: 4 is the boundary zone; 5 is the block zone; 6 is the core zone

Таблица 3. Рентгенографическая характеристика плагиоклаза щелочно-гранитного комплекса Халдзан-Бурэгтэг

Table 3. X-ray characteristic of plagioclase of alkali-granite complex Khaldzan-Buregteg

Порода/Rock			Выход Exit	№ пробы Sample	060	204	201	040, 002	113	13-00	131	131	Si/Al	t1o	t1m	ΣAl	ΔAl	n
Нордмаркиты Nordmarkites			C (N)	ХБ-5-55	42,40	51,30	22,05	27,93	50,75	24,30	29,80	31,43	2,92	0,54	0,79	0,81	0,83	1,92
			Ю (S)	ХБ-5-93	42,54	51,35	22,07	27,90	50,80	24,31	29,97	31,44	2,92	0,67	0,75	0,87	0,85	1,92
Щелочные граниты Alkaline granites			C (N)	ХБ-5-404	42,49	51,28	22,02	27,80	50,71	24,29	29,80	31,39	2,77	0,59	0,72	0,89	0,80	6,22
			Ю (S)	ХБ-5-92	42,46	51,26	22,04	27,91	50,71	24,35	29,95	31,41	2,92	0,68	0,75	0,88	0,82	1,92
Редкометалльные щелочные граниты (РГЩ) 5-й фазы Rare-metal alkaline granites of the 5 th phase			Ю (S)	ХБ-РГ-5	42,51	51,16	22,08	27,98	50,61	24,22	30,02	31,26	2,92	0,86	0,69	0,99	0,86	1,92
Редкометалльные щелочные граниты (РГЩ) 7-й фазы Rare-metal alkaline granites of the 7 th phase			Ю (S)	ХБ-РГ-8	42,51	51,18	22,02	27,96	50,63	24,30	30,12	31,29	2,92	0,91	0,67	0,97	0,80	1,92
Пегматиты/Pegmatites	Жила «Пологая» Vein «Pologaya»	Краевая boundary zone	C (N)	ХБ-5-42	42,50	51,16	22,04	27,95	50,59	24,26	30,11	31,38	2,77	0,85	0,64	0,98	0,82	6,22
		Блоковая Block zone		ХБ-5-45	42,51	51,27	22,07	27,98	50,71	24,32	30,24	31,35	2,85	0,97	0,62	0,91	0,85	4,02
	Пегматит мелких жил гребня Pegmatites of small veins of a comb		Ю (S)	ХБ-5-102	42,48	51,23	22,04	27,95	50,68	24,26	30,18	31,38	2,92	0,89	0,68	0,92	0,82	1,92
	Пегматит участка Цахирин Pegmatites of the zone Tsakhirin		C (N)	ХБ-5-31	42,46	51,18	22,04	27,98	50,60	24,25	30,11	31,31	2,69	0,92	0,59	0,94	0,82	8,50
				ХБ-5-402	42,49	51,32	22,18	28,04	50,72	24,29	30,19	31,41	2,53	0,93	0,53	0,86	0,94	13,39
	Метасоматиты участка Цахирин Metasomatites of the zone Tsakhirin			C (N)	ХБ-5-53-1	42,41	51,25	22,08	27,76	50,67	24,26	30,08	31,43	2,69	0,80	0,63	0,86	0,86
ХБ-5-53-5					42,41	51,21	22,06	27,69	50,64	24,30	30,12	31,38	2,77	0,86	0,63	0,89	0,84	6,22

Примечание: Ю – Южный выход массива, С – Северный выход массива.

Note: S is the South exit of the massif; N is the Northern exit of the massif.

По результатам PCA были рассчитаны рентгенографические характеристики плагиоклаза, приведенные в табл. 3. Si/Al-отношение в изученных плагиоклазах варьирует от 2,45 до 2,92. По параметру ΣAl, укладываемому в интервал от 0,81 до 0,97, и показателю ΔAl, изменяющемуся в пределах 0,80–0,94, рассматриваемые плагиоклазы отнесены к низкому альбиту. По номограмме упорядоченности плагиоклазов по методу Дж. Смита [23] пробы попадают в область упорядоченных разностей. От одной фазы к другой в плагиоклазах наблюдаются незначительные вариации всех рентгенографических параметров, что отражает индивидуальные особенности их формирования. Несколько менее кислым и одновременно более структурно упорядоченным оказывается альбит из пород Северного выхода.

Согласно результатам РСМА (табл. 4) изученные плагиоклазы содержат следующие примесные компоненты: MgO, CaO, FeO* и K₂O. Наиболее распространенной примесью является FeO*. Содержания суммарного железа варьируют от 0,06 до 0,82 мас. %, при этом наибольшие концентрации характерны для плагиоклаза Южного выхода. Наблюдается обратная зависимость содержаний CaO и MgO от содержания FeO*. Содержания этих ком-

понентов увеличивается при уменьшении содержаний железа: MgO от 0,05 мас. % в нордмаркитах до 0,22 мас. % в пегматитах, содержания CaO – 0,20–0,21 мас. %. Для плагиоклазов Южного выхода компоненты CaO и MgO не характерны. Содержание K₂O относительно других примесей низкое и укладывается в интервал от 0,06 до 0,27 мас. %.

Кристаллохимические формулы плагиоклаза разных пород комплекса, рассчитанные по данным химического состава (табл. 4), имеют следующий вид: нордмаркиты ЮВ Na_{1,02}(Al_{0,93}Fe_{0,03})_{0,96}Si_{3,02}O₈; нордмаркиты СВ (Na_{1,01}K_{0,01})_{1,02}Al_{0,99}Si_{2,97}O₈; щелочные граниты ЮВ Na_{0,97}(Al_{0,96}Fe_{0,03})_{0,99}Si_{3,04}O₈; щелочные граниты СВ Na_{0,99}Al_{1,01}Si_{2,99}O₈; редкометалльные щелочные граниты ЮВ Na_{0,97}(Al_{0,99}Fe_{0,01})_{1,00}Si_{3,04}O₈; пегматиты ЮВ Na_{0,92}(Al_{0,92}Fe_{0,02})_{0,94}Si_{3,15}O₈; пегматиты СВ (Na_{0,99}Ca_{0,01}Mg_{0,01})_{1,01}Al_{0,93}Si_{2,98}O₈; метасоматиты СВ (Na_{0,99}Ca_{0,01})_{1,00}Al_{1,01}Si_{2,99}O₈.

Для КППШ и плагиоклазов комплекса были получены спектры рентгенолюминесценции (РЛ, λ, нм) в оптическом диапазоне длин волн (250–900 нм) под действием рентгеновского возбуждения. Обнаружены следующие центры: дырочные O[–] комплексы SiO₄[–] и AlO₄[–], а также Ti⁴⁺, Ce³⁺, Mn²⁺, Fe³⁺. Центры РЛ Ce³⁺, Mn²⁺ и РЛ SiO₄^{2–} и AlO₄[–] в исследу-

Таблица 4. Химический состав репрезентативных проб плагиоклаза комплекса Халдзан-Бурэгтэг

Table 4. Chemical composition of representative samples of plagioclase of the complex Khaldzan-Buregteg

Порода, фаза Rock, phase	Нордмаркиты Nordmarkites		Щелочные граниты Alkaline granites			РЩГ rare-metal alkaline granites		Перматиты Pegmatites				Метасоматиты Metasomatites	
						5-я фаза 5 phase	7-я фаза 7 phase						
Выход/Exit	С (N)	Ю (S)	С (N)		Ю (S)	Ю (S)		С (N)		Ю (S)		С (N)	
№ пробы/Sample	X6-5-93	X6-5-55	X6-5-404	X6-4-20	X6-5-99	X6-ПГ-5	X6-ПГ-8	X6-4-31	X6-5-402	X6-4-16	X6-5-102	X6-5-53-1	X6-5-53-2
Спектр/Spectrum	Cn2	Cn1	Cn1	Cn3	Cn2	Cn1	Cn1	Cn1	Cn1	Cn1	Cn2	Cn1	Cn1
SiO ₂ (wt %)	68,11	69,21	69,09	68,53	67,81	68,91	70,01	70,09	68,33	71,09	68,73	66,41	68,29
Al ₂ O ₃	19,36	18,02	19,25	19,56	18,23	19,02	18,00	18,25	19,66	17,62	17,66	19,09	18,45
FeO	0,00	0,72	0,41	0,12	0,82	0,22	0,03	0,09	0,00	0,41	0,06	0,00	0,64
CaO	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,21	0,00	0,00	0,24	0,20
MgO	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00
Na ₂ O	11,98	12,09	10,92	11,74	11,19	11,39	11,81	10,92	11,72	10,72	12,72	11,42	10,08
K ₂ O	0,09	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,06	0,00	0,27
Сумма/Total	99,71	100,04	99,67	100,02	98,05	99,54	99,85	99,77	100,07	99,84	99,17	97,16	97,66
Количество катионов рассчитано на 8 атомов кислорода/Number of cations is calculated on 8 oxygen atoms													
Si	2,97	3,02	3,05	2,99	3,04	3,04	3,07	3,10	2,98	3,15	3,01	2,99	3,09
Al	0,99	0,93	1,00	1,01	0,96	0,99	0,93	0,95	1,01	0,92	0,91	1,01	0,98
Fe	0,00	0,03	0,02	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02
Ca	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
Mg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	1,01	1,02	0,93	0,99	0,97	0,97	1,00	0,93	0,99	0,92	1,08	0,99	0,88
K	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
Катионы/Cations	5												
Ап-минал	0,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35	0,98	0,00	0,00	1,15	1,07
Аб-минал	98,56	100,00	100,00	99,61	100,00	100,00	100,00	99,65	98,58	100,00	99,69	98,85	97,21
Ог-минал	0,49	0,00	0,00	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,44	0,00	0,31	0,00	1,72
Состав Composition	Or _{0,49} An _{0,56} Ab _{98,56}	Or _{0,00} Ab _{100,00}	Or _{0,00} Ab _{100,00}	Or _{0,39} An _{0,00} Ab _{99,61}	Or _{0,00} Ab _{100,00}	Or _{0,00} Ab _{100,00}	Or _{0,00} Ab _{100,00}	Or _{0,00} An _{0,35} Ab _{99,65}	Or _{0,44} An _{0,58} Ab _{98,58}	Or _{0,00} Ab _{100,00}	Or _{0,31} An _{0,00} Ab _{99,69}	Or _{0,00} An _{1,15} Ab _{98,85}	Or _{1,72} An _{0,07} Ab _{97,21}

Примечание: Ю – Южный выход массива, С – Северный выход массива.

Note: S is the South exit of the massif, N is the Northern exit of the massif.

емых КППШ указывают на наличие пертитов, ранее подтвержденных по данным РСА и РЭМА. В то же время в КППШ пегматитовых жил РЛ SiO₄²⁻ и AlO₄⁴⁻ отсутствует, однако результаты РСА и РЭМА, а также оптические данные свидетельствуют о пертитизации КППШ пегматитов. По-видимому, отсутствие данных центров РЛ связано с эффектом «тушения» интенсивным свечением рентгенолюминесценции Fe³⁺, которое в этих пегматитах максимально (I, усл. ед. 3000–4000).

Породы комплекса являются малоглубинными образованиями, о чем свидетельствует большая интенсивность РЛ Fe³⁺ и низкие соотношения Mn²⁺/Fe³⁺ в КППШ, указывающие на высокий окислительный потенциал среды минералообразования, столь характерный для малоглубинных формаций. Кроме того, появление полосы Fe³⁺ в спектрах РЛ ППП связано с устойчивостью и активностью ионов Fe³⁺ в щелочных средах, что является индикатором щелочности минералообразующей среды [24–26]. Интенсивная и доминирующая сре-

ди центров свечения полоса Fe³⁺ в спектрах РЛ полевых шпатов щелочных гранитоидов, их позднемагматических дифференциатов и постмагматических производных свидетельствует о повышенной щелочности первичного расплава, характерной для всех фаз комплекса. Интенсивность РЛ Fe³⁺ последовательно возрастает от первой фазы гранитоидов к редкометалльным 5-й и 7-й фазам, а в пегматитах достигает максимума. Для плагиоклаза и КППШ нордмаркитов характерно относительное увеличение отношения Mn²⁺/Fe³⁺ (0,18–0,3), что, возможно, связано с несколько пониженной щелочностью материнских для них расплавов и с сравнительно медленным остыванием этих пород относительно более поздних фаз щелочных и редкометалльных гранитов. По интенсивности РЛ Fe³⁺ в полевых шпатах отчетливо разделяются Южный и Северный выходы комплекса. Более интенсивное свечение Fe³⁺ свойственно КППШ Южного выхода, что свидетельствует о более высокой щелочности среды минералообразования этого выхода.

В спектрах РЛ в исследуемых плагиоклазах и КППШ редкометалльных фаз зафиксировано излучение Tl^+ (285 нм), что, как известно, является индикатором редкометалльности этих пород [26].

Наибольшее значение среди элементов-примесей для полевых шпатов обычно имеют Li, Rb и двухвалентные щелочно-земельные элементы – Ba и Sr. При этом Ba и Rb в основном концентрируются в КППШ, а Li и Sr – в плагиоклазах. Данная закономерность прослеживается и для полевых шпатов исследуемого комплекса. Согласно данным спектрального анализа плагиоклазы комплекса обогащены относительно КППШ Mn, Zr, Be, Zn, редкими землями, а КППШ – Pb, La, Tl, Mo. Различия в концентрации элементов прослеживаются и в сравнении отдельных выходов массива. Так, примесь Li обнаруживается исключительно в КППШ пород Южного выхода, а Ce в КППШ и плагиоклазах Северного выхода. Sr обнаружен только в полевых шпатах Северного выхода. С падением температуры кристаллизации и при повышении давления летучих содержание Sr в КППШ растет от 100 г/т в более высокотемпературных раннемагматических гранитных фазах до 400–1020 г/т в более низкотемпературных постмагматических – пегматитах. Максимальная концентрация элемента обнаружена в блоковом КППШ пегматитовой жилы. Количество Са как в КППШ, так и в плагиоклазах растет в следующем направлении: граниты–пегматиты–метасоматиты. Следует отметить, что плагиоклазы и КППШ метасоматитов, очевидно, в силу характера своего развития – метасоматоза, гораздо богаче очень многими элементами-примесями и прежде всего TR, Y и Nb, определяющими рудную специализацию метасоматитов. Обращает на себя внимание сравнительно высокое содержание во всех полевых шпатах примесного железа, что обусловлено повышенным фоном щелочности минералообразования на объекте. Концентрация элемента достигает максимальных значений в плагиоклазе метасоматитов (до 8100 г/т).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zr-Nb-REE mineralization in peralkaline granites from the Amis Complex, Brandberg (Namibia): evidence for magmatic pre-enrichment from melt inclusions / A.K. Schmitt, R.B. Trumbull, P. Dulski, R. Emmermann // *Economic geology*. – 2002. – V. 97. – P. 399–413.
2. Salvi S., Williams-Jones A.E. Alteration, HFSE mineralization and hydrocarbon formation in peralkaline igneous systems: Insights from the Strange Lake Pluton, Canada // *Lithos*. – 2006. – V. 91. – P. 19–34.
3. Distribution and evolution of zirconium mineralization in peralkaline granites and associated pegmatites of the Khan Bogd Complex, southern Mongolia / J. Kynicky, A.R. Chakhmouradian, C. Xu, L. Krmicek, M. Galiova // *Canadian Mineralogist*. – 2011. – V. 49. – P. 947–965.
4. Gysi A.P., Williams-Jones A.E. Hydrothermal mobilization of pegmatite-hosted REE and Zr at Strange Lake, Canada: a reaction path model // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2013. – V. 122. – P. 324–352.

Заключение

Комплекс проведенных исследований полевых шпатов щелочно-гранитного комплекса Халдзан-Бурэгтэг позволил выявить ряд типоморфных характеристик этих минералов, отражающий особенности их формирования и рудную специализацию объекта.

Установлено, что все породы комплекса имеют двуполевошпатовый состав с преобладанием калиевой фазы. Среди КППШ доминирует максимальный микроклин, а среди плагиоклазов – низкий альбит.

Общим для всех исследованных полевых шпатов является чрезвычайно интенсивное свечение РЛ Fe^{3+} и повышенное содержание трехвалентной формы этого элемента в составе минералов, что указывает на повышенный щелочной фон процессов минералообразования на объекте.

Типохимизм полевых шпатов Северного и Южного выходов Халдзан-Бурэгтэгского щелочно-гранитного комплекса заметно различается в силу отличий щелочности условий их минералообразования и интенсивности проявления автометасоматических процессов. Полевые шпаты пород Северного выхода демонстрируют более широкий спектр примесных элементов, прежде всего TR, Y и Nb, подчеркивающих металлогеническую специализацию объекта.

Температура кристаллизации полевого шпата, согласно характеру распада твердых растворов, лежала в интервале 250–700 °C для гранитных фаз и 200–380 °C для пегматитов и метасоматитов комплекса.

Таким образом, закономерные изменения типоморфных особенностей полевых шпатов в породах от более высокотемпературных раннемагматических гранитных фаз к более низкотемпературным позднемагматическим образованиям и постмагматическим производным комплекса отражают характер дифференциации и изменение условий их образования.

5. REE and HFSE mineralization in peralkaline granites of the Ambimihavavy alkaline complex, Ampasindava peninsula, Madagascar / G. Estrade, S. Salvi, D. Beziata, S. Rakotovaoc, R. Rakotondrazafyd // *Journal of African Earth Sciences*. – 2014. – V. 94. – P. 141–155.
6. Dostal J., Kontak D.J., Karl S.M. The Early Jurassic Bokan Mountain peralkaline granitic complex (southeastern Alaska): Geochemistry, petrogenesis and rare-metal mineralization // *Lithos*. – 2014. – V. 202–203. – P. 395–412.
7. Williams-Jones A.E., Vasyukova O. Fluoride-silicate melt immiscibility and its role in REE ore formation: Evidence from the Strange Lake rare metal deposit, Québec-Labrador, Canada // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2014. – V. 139. – P. 110–130.
8. Permian alkaline granites in the Erenhot-Hegenshan belt, northern Inner Mongolia, China: Model of generation, time of emplacement and regional tectonic significance / Ying Tong, Bor-ming Jahn, Tao Wang, Da-wei Hong, E.I. Smith, Min Sun, Jian-feng Gao, Qi-di Yang, Wei Huang // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2015. – V. 97. – P. B. – P. 320–336.

9. The genesis of Zr-Nb-REE mineralisation at Khalzan Buregte (Western Mongolia) reconsidered / U. Kempe, R. Möckel, T. Graupner, J. Kynicky, E. Dombond // *Ore Geology Reviews*. – 2015. – V. 64. – P. 602–625.
10. Андреева И.А. Генезис и механизмы образования редкометалльных щелочных гранитов массива Халдзан-Бурегтей, Монголия: данные изучения расплавных включений // *Петрология*. – 2016. – Т. 24. – № 5. – С. 499–514.
11. Халдзан-Бурегтейский массив щелочных и редкометалльных магматических пород: строение, геохронология, и геодинамическое положение в каледонидах западной Монголии / В.И. Коваленко, В.В. Ярмолук, Е.Б. Сальникова, П.М. Карташов, В.П. Ковач, И.К. Козаков, А.М. Козловский, А.Б. Котов, В.А. Пономарчук, Е.Н. Листратова, С.З. Яковлева // *Петрология*. – 2004. – Т. 12. – № 5. – С. 467–494.
12. Коваленко В.И., Козловский А.М., Ярмолук В.В. Отношение элементов-примесей как отражение смешимости источников и дифференциации магм щелочных гранитоидов и базитов Халдзан-Бурегтейского массива и одноименного редкометалльного месторождения, Западная Монголия // *Петрология*. – 2009. – Т. 17. – № 2. – С. 175–196.
13. Карташов П.М., Волошин А.В., Пахомовский Я.А. О зональном кристаллическом гадолините из щелочно-гранитных пегматитов Халдзан-Бурэгтэга (Монгольский Алтай) // *Записки Всероссийского минералогического общества*. – 1993. – № 3. – С. 65–79.
14. Зенина К.С. Коноваленко С.И. Сравнительная топоминералогия щелочных гранитоидов Монголии // *Корреляция алтаид и уралид: магматизм, метаморфизм, стратиграфия, геохронология, геодинамика и металлогеническое прогнозирование: материалы Второго Российско-Казахстанского международного научного совещания*. – Новосибирск, 2014. – С. 61–65.
15. Зенина К.С. Коноваленко С.И. Минералогические особенности щелочно-гранитных пегматитов Халдзан-Бурэгтэгского массива (Западная Монголия) // *Записки Российского минералогического общества*. – 2016. – № 3. – С. 63–80.
16. Минералы: Справочник. – М.: Наука, 2003. – Т. 5. – Вып. 1. – 583 с.
17. Hovis G.L. Unit – cell dimensions and molar volumes for a sanidine analbite ion-exchange series // *Amer. Miner.* – 1977. – V. 62. – № 7. – P. 672–679.
18. Кумеев С.С. Полевые шпаты – петрогенетические индикаторы. – М.: Недра, 1982. – 205 с.
19. Слюдоносные пегматиты Северной Карелии / под ред. В.В. Гордиенко, В.А. Леоновой. – Л.: Недра, 1976. – 367 с.
20. Зенина К.С., Коноваленко С.И. Минеральный состав и редкометалльная минерализация метасоматитов щелочно-гранитных пегматоидов участка Цахирын (Западная Монголия) // *Минералогия, геохимия и полезные ископаемые Азии*. – Томск, 2013. – Вып. 2. – С. 42–46.
21. Руденко С.А. К вопросу о морфологии пертитовых сростаний полевых шпатов // *Записки Всероссийского минералогического общества*. – 1949. – № 4. – С. 266–269.
22. Stewart D.B., Wright T.L. Al/Si order and symmetry of natural potassium feldspars and the relationship of strained cell parameters to bulk composition // *Bull. Soc. frans. miner er cristallogr.* – 1975. – V. 97. – № 2. – P. 356–377.
23. Пущаровский Д.Ю. Рентгенография минералов. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2000. – 288 с.
24. Борозновская Н.Н. Особенности рентгенолюминесценции полевых шпатов как показатели их генезиса // *Записки Всероссийского минералогического общества*. – 1989. – № 1. – С. 110–119.
25. Telfer D.J., Walker G. Optical detection of Fe³⁺ in lunar plagioclase // *Nature*. – 1975. – V. 258. – P. 694–695.
26. Кузнецов Г.В., Таращан А.Н. Люминесценция минералов гранитных пегматитов / АН УССР, Институт геохимии и физики минералов. – Киев: Наукова думка, 1988. – 180 с.

Поступила 25.08.2016 г.

Информация об авторах

Зенина К.С., ассистент кафедры минералогии и геохимии геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

Небера Т.С., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер центра коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» Национального исследовательского Томского государственного университета.

Коноваленко С.И., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры минералогии и геохимии геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDC 549.651/549.02

FELDSPAR OF ALKALI-GRANITE COMPLEX KHALDZAN-BUREGTEG (WESTERN MONGOLIA): FEATURES OF STRUCTURE AND CHEMICAL COMPOSITION

Ksenia S. Zenina¹,
kszenina@ggf.tsu.ru

Tatiana S. Nebera¹,
TSNebera@mail.ru

Sergey I. Konovalenko¹,
konov@ggf.tsu.ru

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

Composition, structure and other features of minerals are the most important genetic characteristics reflecting the conditions of their formation and allowing reconstructing the life of a geological object. Feldspar due to its crystallization in a wide range of temperatures and pressures, isomorphous substitutions and breakdown of solid solutions, is the important object of mineralogical studies.

The aim of the study is to identify characteristics of a structure and chemical composition of feldspar from multiphase alkali-granite complex Khaldzan-Buregteg in Western Mongolia.

Object of the research: alkaline granitic formation of Lake zone of Western Mongolia, which brings together a number of large massifs of the Khaldzan-Buregteg group (Ulaan-Khuren, Gurvan-Uneet, Ulaan-Unet, Tsogtu-Ula, Tsohni Ula, Khaldzan-Buregteg) of Early Paleozoic age, as well as the late-magmatic differentiates granitoid – pegmatites and postmagmatic derivatives – hydrothermalites and metasomatic rocks.

Research methods. The authors have carried out the comprehensive study of feldspar, including optical and morphological analysis of the mineral, using X-ray diffraction, X-ray fluorescent, X-ray microanalysis as well as quantitative and semi-quantitative spectral analysis.

Results. The paper describes the morphology and habitus of the investigated feldspar; perthitic structures of the mineral were studied; the X-ray diffraction characteristics of K-feldspar and plagioclase were determined. The authors obtained the data on chemical composition of feldspar and calculated the crystallochemical formulas of the mineral. It was ascertained that all the considered species rocks of the complex Khaldzan-Buregteg (nordmarkites, granites, pegmatites and metasomatites) have two-feldspar composition with predominance of potassium phase. The maximum microcline dominates among potassium feldspar, low albite dominates among plagioclase. Based on the typomorphic characteristics the authors carried out the genetic typing of potassium feldspar, determined rocks crystallization temperature, evaluated the evolution of the mineral formation environment on the object. It was determined that the regular change of structural and chemical features of feldspars is observed from high-temperature granite phases to lower-temperature late-magmatic and post-magmatic derived formations.

Key words:

Feldspar, massif Khaldzan-Buregteg, typomorphism, alkaline granites, rare-metal granites, pegmatites.

REFERENCES

- Schmitt A.K., Trumbull R.B., Dulski P., Emmermann R. Zr-Nb-REE mineralization in peralkaline granites from the Amis Complex, Brandberg (Namibia): evidence for magmatic pre-enrichment from melt inclusions. *Economic geology*, 2002, vol. 97, pp. 399–413.
- Salvi S., Williams-Jones A.E. Alteration, HFSE mineralization and hydrocarbon formation in peralkaline igneous systems: Insights from the Strange Lake Pluton, Canada. *Lithos*, 2006, vol. 91, pp. 19–34.
- Kynicky J., Chakhmouradian A.R., Xu C., Krmicek L., Galiova M. Distribution and evolution of zirconium mineralization in peralkaline granites and associated pegmatites of the Khan Bogd Complex, southern Mongolia. *Canadian Mineralogist*, 2011, vol. 49, pp. 947–965.
- Gysi A.P., Williams-Jones A.E. Hydrothermal mobilization of pegmatite-hosted REE and Zr at Strange Lake, Canada: A reaction path model. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, vol. 122, pp. 324–352.
- Estrade G., Salvi S., Beziata D., Rakotovaoc S., Rakotondrazafyd R. REE and HFSE mineralization in peralkaline granites of the Ambohimirahavavy alkaline complex, Ampasindava peninsula, Madagascar. *Journal of African Earth Sciences*, 2014, vol. 94, pp. 141–155.
- Dostal J., Kontak D.J., Karl S.M. The Early Jurassic Bokan Mountain peralkaline granitic complex (southeastern Alaska): Geochemistry, petrogenesis and rare-metal mineralization. *Lithos*, 2014, vol. 202–203, pp. 395–412.
- Williams-Jones A.E., Vasyukova O. Fluoride-silicate melt immiscibility and its role in REE ore formation: Evidence from the Strange Lake rare metal deposit, Québec-Labrador, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, vol. 139, pp. 110–130.
- Ying Tong, Bor-ming Jahn, Tao Wang, Da-wei Hong, Smith E.I., Min Sun, Jian-feng Gao, Qi-di Yang, Wei Huang. Permian alkaline granites in the Erenhot-Hegenshan belt, northern Inner Mongolia, China: Model of generation, time of emplacement and regional tectonic significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, vol. 97, pp. 320–336.
- Kempe U., Möckel R., Graupner T., Kynicky J., Dombond E. The genesis of Zr-Nb-REE mineralisation at Khalzan Buregte (Western Mongolia) reconsidered. *Ore Geology Reviews*, 2015, vol. 64, pp. 602–625.
- Andreeva I.A. Genesis and mechanisms of formation of rare-metal alkaline granites of the Khalzan Buregteg massif, Mongolia: data on study of melt inclusions. *Petrology*, 2016, vol. 24, no. 5, pp. 499–514. In Rus.
- Kovalenko V.I., Yarmolyuk V.V., Salnikova E.B., Kartashov P.M., Kovach V.P., Kozakov I.K., Kozlovsky A.M., Kotov A.B., Ponomarchuk V.A., Listratova E.N., Yakovleva S.Z.

- The Khalzan Buregteg massif of alkaline and rare-metal igneous rocks: structure, geochronology and geodynamic situation in Caledonia of Western Mongolia. *Petrology*, 2004, vol. 12, no. 5, pp. 467–494. In Rus.
12. Kovalenko V.I., Kozlovsky A.M., Yarmolyuk V.V. Ratio of impurity elements as a reflection of constant sources and differentiation of alkaline magmas of the granitoids and basites of the Khalzan Buregteg massif and the same name rare-metal deposit, Western Mongolia. *Petrology*, 2009, vol. 17, no. 2, pp. 175–196. In Rus.
 13. Kartashov P.M., Voloshin A.V., Pahomovsky Ya.A. On zonal crystalline gadolinite of alkali granite pegmatites of the Khalzan Buregteg (Mongolian Altai). *Proceedings of the Russian Mineralogical Society*, 1993, no. 3, pp. 65–79. In Rus.
 14. Zenina K.S., Konovalenko S.I. Sravnitel'naya topomineralogiya shchelochnykh granitoydov Mongolii [Comparative topomineralogy of alkaline granitoids of Mongolia]. *Korrelyatsiya altaid i uralid: magmatizm, metamorfizm, stratigrafiya, geokhronologiya, geodinamika i metallogenicheskoe prognozirovanie: Materialy Vtorogo Rossiysko-Kazhstanskogo mezhdunarodnogo nauchnogo soveshchaniya* [Correlation of Altai and Uralid: magmatism, metamorphism, stratigraphy, geochronology, geodynamics and metallogenetic forecasting. Proc. of the Second Russian-Kazakhstan international scientific meeting]. Novosibirsk, 2014. pp. 61–65.
 15. Zenina K.S., Konovalenko S.I. Mineralogical features of alkaline granite pegmatites in the Khalzan-Buregteg massif (Western Mongolia). *Proceedings of the Russian Mineralogical Society*, 2016, no. 3, pp. 63–80. In Rus.
 16. *Mineraly. Spravochnik* [Mineralogy. Reference book]. Moscow, Nauka Publ., 2003. Vol. 5, no. 1, 583 p.
 17. Hovis G.L. Unit – cell dimensions and molar volumes for a sanidine analbite ion-exchange series. *American mineralogist*, 1977, vol. 62, no. 7, pp. 672–679.
 18. Kumeev S.S. *Polevye shpaty – petrogeneticheskie indicatory* [Feldspars – petrogenetic indicators]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 205 p.
 19. *Slyudonosnye pegmatity Severnoy Karelii* [Mica-bearing pegmatites of North Karelia]. Eds. V.V. Gordienko, V.A. Leonova. Leningrad, Nedra Publ., 1976. 367 p.
 20. Zenina K.S. Mineralny sostav i redkometallnaya mineralizatsiya metasomatitov shchelochno-granitnykh pegmatoydov uchastka Tsakhirin (Zapadnaya Mongoliya) [Mineral composition and mineralization of rare-metal metasomatic rocks of alkali granite pegmatites of the area Tsakhirin (Western Mongolia)]. *Mineralogiya, geokhimiya i poleznye iskopaemye Azii* [Mineralogy, geochemistry and mineral resource of Asia]. Tomsk, 2013. Iss. 2, pp. 42–46.
 21. Rudenko S.A. K On the issue of morphology of perthites intergrowth of feldspars. *Proceedings of the Russian Mineralogical Society*, 1949, no. 4, pp. 266–269. In Rus.
 22. Stewart D.B., Wright T.L. Al/Si order and symmetry of natural potassium feldspars and the relationship of strained cell parameters to bulk composition. *Bull. Soc. frans. miner et cristallogr*, 1975, vol. 9, no. 2, pp. 356–377.
 23. Pushcharovsky D.Yu. *Rentgenografiya mineralov* [Radiography of minerals]. Moscow, Geoinformmark Publ., 2000. 288 p.
 24. Boroznovskaya N.N. Osobennosti rentgenoluminesentsii polevykh shpatov kak pokazateli ikh genezisa [Features of X-ray luminescence of feldspars as indicators of their genesis]. *Proceedings of the Russian Mineralogical Society*, 1989, no. 1, pp. 110–119.
 25. Telfer D.J., Walker G. Optical detection of Fe³⁺ in lunar plagioclase. *Nature*, 1975, vol. 258, pp. 694–695.
 26. Kuznetsov G.V., Tarashchan A.N. *Lyuminesentsiya mineralov granitnykh pegmatitov* [Luminescence of minerals from granite pegmatites]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1988. 180 p.

Received: 25 August 2016.

Information about the authors

Ksenia S. Zenina, assistant, National Research Tomsk State University.

Tatiana S. Nebera, Cand. Sc., chief engineer, National Research Tomsk State University.

Sergey I. Konovalenko, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk State University.

УДК 539.3

ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ И КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СТРУКТУРЫ, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПЛАСТИН С ВНУТРЕННИМ НАБОРОМ ЛОКАЛЬНЫХ РЕБЕР, ПРИМЕНЯЕМОЙ В ТЕОРИИ ГИРОСКОПОВ

Яковлева Татьяна Владимировна¹,
yan-tan1987@mail.ru

Крысько Антон Вадимович^{1,2},
anton.krysko@gmail.com

Кружилин Вадим Сергеевич¹,
kruzhilin93@mail.ru

¹ Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина,
Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77.

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

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки алгоритмических методов повышения надежности и точности работы гироскопических приборов, которые находят свое применение в нефтегазовой промышленности, так как прочность, точность и стойкость к высокой температуре датчиков чрезвычайно важна во время бурения для контроля пространственной ориентации скважин и скважинных объектов.

Цель работы заключается в построении математической модели вынужденных колебаний и контактного взаимодействия структуры, состоящей из двух пластин с внутренним набором ребер и зазорами между элементами, которая найдет свое применение в теории гироскопов. Для исследования подобных конструктивно-нелинейных задач применены методы качественной теории дифференциальных уравнений, вейвлет-анализ, три метода (Вольфа, Розенштейна, Канца) для анализа знака старшего показателя Ляпунова, численное моделирование с использованием программного пакета MATLAB. Решение проведено методом Бубнова–Галеркина в высших приближениях по пространственной координате и методом Рунге–Кутты 4-го порядка точности по времени.

Результаты. Изучено влияние количества ребер между пластинами на характер их колебаний и контактное взаимодействие при продольном нагружении на верхнюю пластину. В ходе проведенных исследований выявлены сценарии перехода системы из гармонического в хаотическое состояние. Рассмотрены две задачи: 1) внутренний набор ребер состоит из двух балок, 2) внутренний набор ребер состоит из трех балок. Выявлено, что при хаотическом режиме в обеих задачах наблюдается явление перемежаемости частот, то есть смена интервалов времени с разными частотами и разными характерами колебаний. Достоверность решения обеспечена применением различных методов определения старшего показателя Ляпунова, сравнением результатов, полученных методом Бубнова–Галеркина и методом конечных разностей.

Ключевые слова:

Распределенные механические структуры, контактное взаимодействие, малые зазоры, вейвлет-анализ, параметрические колебания, показатели Ляпунова.

Введение

В нефтегазовой промышленности в различных технологиях добычи нефти и газа в настоящее время все больше находят свое применение микромеханические акселерометры при стандартном статическом контроле скважин с целью оценить и картографировать существующую скважину сразу после бурения или по прошествии времени. Кроме того, они активно применяются в динамическом направленном бурении, когда требуется достичь больших подземных участков с локальной платформы (например, с океанской платформы) или подвести к стволу скважины большую часть резервуара (например, горизонтальное бурение через продуктивный горизонт). При измерении во время бурения, которое выполняется в жестких условиях окружающей среды и при котором требуется направлять бурильную головку в заданный район. Для этих измерений требуются прочные, высокоточные и стойкие к высокой температуре датчики. В качестве

конкретных примеров таких разработок можно привести системы динамической стабилизации подвижных объектов, инерциальные средства контроля пространственной ориентации скважин и скважинных объектов. Поэтому в последние десятилетия наиболее интенсивно и динамично развивающимся направлением была признана микросистемная техника [1–5], в состав которой входят миниатюрные датчики инерциальной и внешней информации, микродвигатели и преобразователи. Таким образом, чрезвычайно важен вопрос изучения новых эффектов, связанных с точностью и надежностью работы приборов, в частности микромеханических акселерометров [6–8]. Последние могут быть описаны с помощью математической модели двух пластин, между которыми имеется набор ребер жесткости в виде параллельных балок и малые зазоры между элементами [9–13]. Наличие малых зазоров между пластинами и балкой при динамическом воздействии различной природы вызывает ха-

отические колебания, которые могут привести к быстрому износу и разрушению элементов конструкции приборов. Анализ характера колебаний приведет к возможности управлять ими [14]. Тем самым важен вопрос влияния контактного взаимодействия слоев и количества подкрепляющих ребер на характер сложных колебаний системы и, как следствие, на точность показаний датчиков. Целью данной работы является изучение условий, при которых возможно возникновение хаотических колебаний подобных систем. Актуальность работ связана с необходимостью решения целого ряда задач для нефтегазовой и железнодорожной отраслей, аэрокосмической, автомобильной промышленности, медицины, робототехники, гироскопических приборов и т. д.

1. Постановка задачи

В работе построена математическая модель вынужденных колебаний и контактного взаимодействия трехслойной структуры, состоящей из двух параллельных пластин с внутренним набором локальных ребер. Этот набор ребер представляет собой в общем случае n параллельных балок, расположенных на симметричном расстоянии от центра пластин. Уравнения для пластин и балок рассматриваются геометрически линейные, пластины подчиняются кинематической модели Кирхгофа–Лява, балки – Эйлера–Бернулли. Между балками и пластинами имеются малые зазоры h_k . Наличие зазора между элементами механической структуры обуславливает необходимость учитывать контактное взаимодействие между ними, то есть решать конструктивно нелинейную задачу по классификации П.А. Лукаша [15]. Контактное взаимодействие учитывается по модели Винклера, предложенной Б.Я. Кантором [16]. Материал балок и пластин упругий и изотропный.

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{12(1-\mu^2)} \nabla_\lambda^4 w_1 + \frac{\partial^2 w_1}{\partial t^2} + \varepsilon \frac{\partial w_1}{\partial t} + q_1(x, y, t) + \\ & + P_x \frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} - \sum_{l=1}^n q_{k1l} = 0, \\ & \frac{1}{12} \frac{\partial^4 w_l}{\partial x^4} + \frac{\partial^2 w_l}{\partial t^2} + \varepsilon \frac{\partial w_l}{\partial t} + q_{k1l} - q_{k2l} = 0, \\ & \frac{1}{12(1-\mu^2)} \nabla_\lambda^4 w_2 + \frac{\partial^2 w_2}{\partial t^2} + \varepsilon \frac{\partial w_2}{\partial t} + \sum_{l=1}^n q_{k2l} = 0, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где $l=\overline{1, n}$, l – номер балки,

$$\begin{aligned} q_{k1l} &= K(w_1 - w_l - h_k) \Psi_{1l}, \\ \Psi_{1l} &= \frac{1}{2} [1 + \text{sign}(w_1 - h_k - w_l)], \\ q_{k2l} &= K(w_l - w_2 - h_k) \Psi_{2l}, \\ \Psi_{2l} &= \frac{1}{2} [1 + \text{sign}(w_l - h_k - w_2)]. \end{aligned}$$

Соотношения q_{k1l} , q_{k2l} представляют собой контактное давление между слоями. Если $w_1 > w_l + h_k$ есть контакт между верхней пластиной и балкой с

номером l , то $\Psi_{1l}=1$, иначе $\Psi_{1l}=0$. Если $w_1 > w_2 + h_k$ есть контакт между нижней пластиной и балкой, то $\Psi_{2l}=1$, иначе $\Psi_{2l}=0$. ∇_λ^4 – бигармонический оператор; w_1 , w_2 – функции прогибов пластины; w_l – функция прогибов балок; K – коэффициент жесткости трансверсального обжатия структуры в зоне контакта; h_k – зазор между слоями; t – время; ε – коэффициент затухания; μ – коэффициент Пуассона; $P_x(y, t) = p_0 \sin(\omega_p t)$ – продольная нагрузка, действующая на верхнюю пластину, приложенная вдоль подкрепляющих ребер.

Система уравнений (1) приведена к безразмерному виду следующим образом:

$$\begin{aligned} x &= a\bar{x}, \quad y = a\bar{y}; \quad \bar{t} = \frac{t}{\tau}, \\ \tau &= \frac{ab}{2h} \sqrt{\frac{\gamma}{Eg}}, \quad \lambda = \frac{a}{b} = 1, \quad h_k = 2h\bar{h}_k, \end{aligned}$$

где a , b – размеры пластин по x и y соответственно, a – длина балок, $2h$ – толщина пластин, g – ускорение силы тяжести, E – модуль упругости, γ – удельный вес материала. Для простоты записи черточки над безразмерными параметрами в системе уравнений (1) опущены.

2. Методы решения

К исходным уравнениям (1) присоединены граничные условия и начальные условия. К этим условиям следует добавить условия непроникновения одной системы в тело другой. Полученные системы конструктивно нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных сводятся к системе обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка методом Бубнова–Галеркина в высших приближениях. Функции w_1 , w_2 , w_l ($l=\overline{1, n}$), являющиеся решениями, приближенно аппроксимируем выражением в виде произведения функций, зависящих от времени и координат:

$$\begin{aligned} w_1 &= \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N A_{1kj}(t) \varphi_{1kj}(x, y), \\ w_2 &= \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N A_{2kj}(t) \varphi_{2kj}(x, y), \\ w_l &= \sum_{k=1}^{N_l} A_{lk}(t) \varphi_{lk}(x), \quad \text{где } l=\overline{1, n}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для решения задачи Коши применены методы Рунге–Кутты 4-го, 6-го, 8-го порядка точности по временной координате. Предпочтение отдаем методу Рунге–Кутты 4-го порядка точности в силу быстроты вычислений. Вопрос о подтверждении достоверности результатов рассмотрен в статье [17, 18].

Далее анализ получаемых результатов проводится с помощью методов нелинейной динамики и качественной теории дифференциальных уравнений: для каждого элемента механической структуры строятся сигналы, фазовые портреты, спектры мощности Фурье, применяются различные вей-

влет-преобразования. Для анализа знака старшего показателя Ляпунова применяются три метода: Вольфа [19], Розенштейна [20], Канца [21].

3. Численный эксперимент

В работе в качестве примера рассмотрены две задачи:

- 1) трехслойная механическая структура, состоящая из двух параллельных пластин, между которыми присутствуют две параллельные балки;
- 2) трехслойная механическая структура, состоящая из двух параллельных пластин, между которыми присутствуют три параллельные балки.

В обеих задачах изучается хаотическая динамика этих структур и их контактное взаимодействие при наличии зазоров между элементами $h_k=0,1$. Исследования проводятся при выборе в качестве граничных условий пластины, шарнирно опирающиеся по контуру, и балки, шарнирно опертые на концах:

$$\begin{aligned} w_{1,2} &= 0; \quad w_{1,2}''|_x = 0; \quad \text{при } x = 0; 1; \\ w_{1,2} &= 0; \quad w_{1,2}''|_y = 0; \quad \text{при } y = 0; 1; \\ w_l &= 0; \quad w_l''|_x = 0; \quad \text{при } x = 0; 1, \quad l = \overline{1, 3}. \end{aligned} \quad (3)$$

Присоединены начальные нулевые условия:

$$w_i|_{t=0} = 0, \quad \dot{w}_i|_{t=0} = 0. \quad (4)$$

Для граничных условий (3) аппроксимирующие функции примут вид

$$\begin{aligned} \varphi_{kj}^{1,2}(x, y) &= \sin(k\pi x) \sin(j\pi y), \\ \varphi_k^l(x) &= \sin(k\pi x), \quad l = \overline{1, 3}. \end{aligned}$$

Изучим характер поведения такой многослойной системы под действием внешней продольной нагрузки $P_x(y, t) = p_0 \sin(\omega_p t)$, приложенной на верх-

нюю пластину, при этом будем учитывать контактное взаимодействие слоев. Частота внешнего воздействия $\omega_p = 5$ выбрана близкой к частоте собственных колебаний пластины, $\varepsilon = 1$, $\mu = 0,3$. Зададим значение прогиба верхней пластины в начальный момент времени: $w_1 = 0,001$.

3.1. Параметрические колебания многослойной системы, состоящей из двух пластин, между которыми имеются две балки

Исследуем характер сложных колебаний многослойного пакета, состоящего из двух параллельных пластин, между которыми находятся две параллельные балки, расположенные на симметричном расстоянии от центра пластин ($y = 0,35$ и $y = 0,65$) (рис. 1).

Приложим продольную нагрузку с амплитудой $p_0 = 0,1$, в этом случае верхняя пластина совершает гармонические колебания на частоте $\omega_p = 5$ и не касается подкрепляющих балок. Балки и нижняя пластина находятся в состоянии покоя.

При интенсивности продольной нагрузки, начиная с $p_0 = 0,10145$, верхняя пластина и обе балки вступают в контактное взаимодействие. При такой нагрузке происходит первое касание, обе балки совершают непродолжительные по времени затухающие колебания на собственной частоте $\omega_0 = 2,8$. Характер колебаний верхней пластины по-прежнему гармонический. Нижняя пластина находится в состоянии покоя.

Увеличим продольную нагрузку до $p_0 = 0,21$. В этом случае происходит контактное взаимодействие верхней пластины с обеими балками. Нижняя пластина находится в состоянии покоя. Характер колебаний верхней пластины и балок хаотический на доминирующей частоте внешнего возбуждения

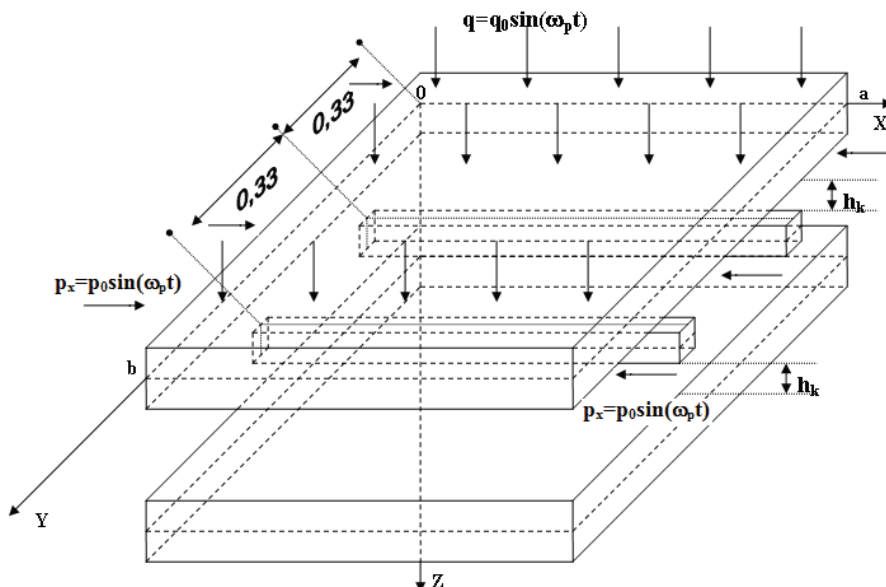


Рис. 1. Расчетная схема многослойной системы, состоящей из двух пластин, между которыми находятся две балки

Fig. 1. Design scheme of a multilayer system consisting of two plates with two beams between them

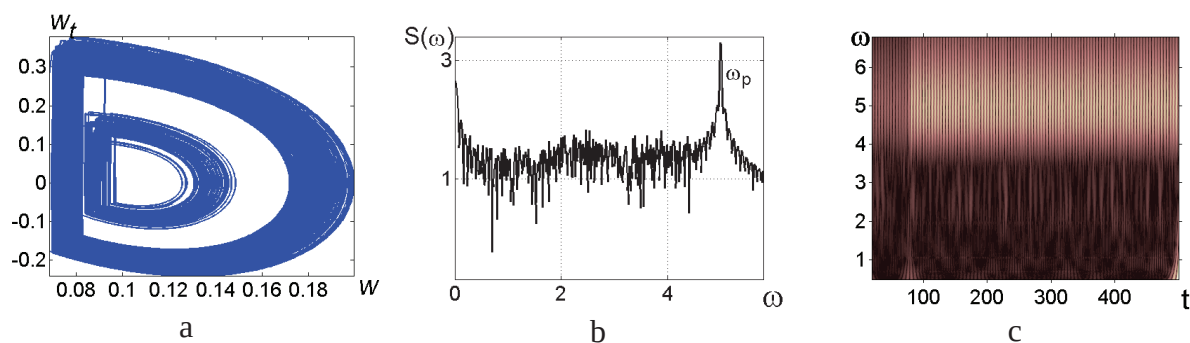


Рис. 2. Фазовый портрет (а), спектр мощности Фурье (b), 2D вейвлет-спектр (с) первой балки ($y=0,35$) при амплитуде нагрузки $p_0=0,21$

Fig. 2. Phase portrait (a), FFT spectrum (b), 2D wavelet-spectrum (c) of the first beam ($y=0,35$) for $p_0=0,21$

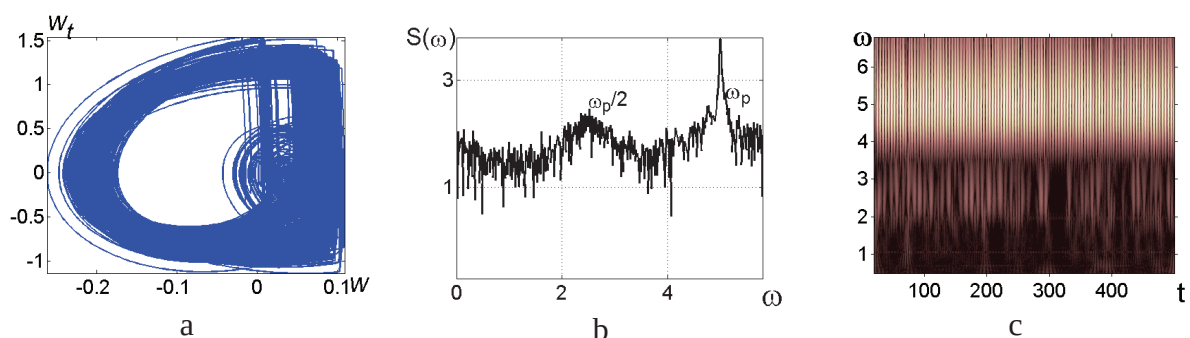


Рис. 3. Фазовый портрет (а), спектр мощности Фурье (b), 2D вейвлет-спектр (с) верхней пластины при амплитуде нагрузки $p_0=0,38$

Fig. 3. Phase portrait (a), FFT spectrum (b), 2D wavelet-spectrum (c) of the upper plate for $p_0=0,38$

$\omega_p=5$. Спектры мощности Фурье представляют собой сплошной пьедестал (рис. 2, а), фазовые портреты – странные аттракторы (рис. 2, б). Однако на графиках 2D вейвлет-спектров Морле наблюдаются зоны перемежаемости частот (рис. 2, с).

В ходе исследований были посчитаны старшие показатели Ляпунова для каждого элемента структуры. С целью избежать численной погрешности анализ был проведен по трем методам: Вольфа, Розенштейна, Канца. В случае воздействия нагрузки интенсивности $p_0=0,21$ старший показатель для первой балки ($y=0,35$) по методу Вольфа равен 0,01844, по методу Розенштейна – 0,06297, по методу Канца – 0,01844. Для верхней пластины старший показатель Ляпунова по трем методам соответственно равен 0,01047, 0,02376, 0,01786. Положительный знак старшего показателя Ляпунова характеризует хаотическое состояние системы.

При увеличении интенсивности нагрузки до $p_0=0,38$ в контактное взаимодействие вступают все элементы трехслойной структуры. Характер колебаний элементов хаотический, но при этом происходит бифуркация Хопфа: $\omega_p/2=2,5$ и $\omega_p=5$ (рис. 3, б). 2D вейвлет-спектры Морле свидетельствуют о наличии перемежаемости частот (рис. 3, с). Таким образом, хаос происходит на бифуркации Хопфа.

3.2. Параметрические колебания многослойной системы, состоящей из двух пластин, между которыми имеются три балки

Исследуем характер сложных колебаний многослойного пакета, состоящего из двух параллельных пластин, между которыми находятся три параллельные балки, расположенные на симметричном расстоянии от центра пластин ($y=0,25$, $y=0,5$ и $y=0,75$) (рис. 4).

При действии продольной нагрузки амплитудой $p_0=0,1$ верхняя пластина совершает гармонические колебания на частоте $\omega_p=5$ и не касается подкрепляющих балок. Балки и нижняя пластина находятся в состоянии покоя.

При интенсивности продольной нагрузки $p_0=0,10141$ происходит первое касание верхней пластины и трех балок, последние совершают непродолжительные по времени затухающие колебания на частоте собственных колебаний $\omega_0=2,8$. Характер колебаний верхней пластины гармонический. Нижняя пластина находится в состоянии покоя.

Увеличим продольную нагрузку до $p_0=0,13$. В этом случае происходит контактное взаимодействие верхней пластины с балками. Нижняя пластина находится в состоянии покоя. Верхняя пластина и балки совершают хаотические колебания с

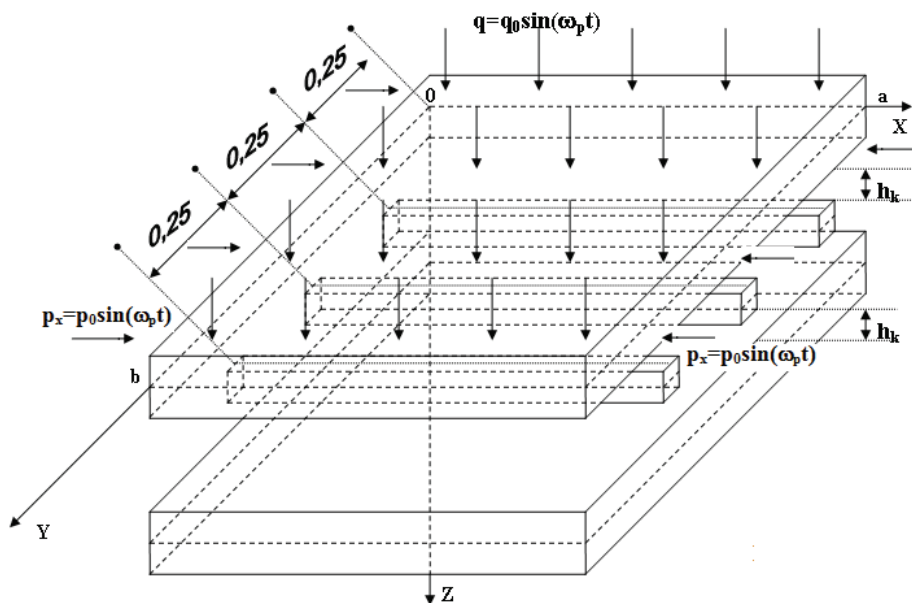


Рис. 4. Расчетная схема многослойной системы, состоящей из двух пластин, между которыми находятся три балки

Fig. 4. Design scheme of a multilayer system consisting of two plates with three beams between them

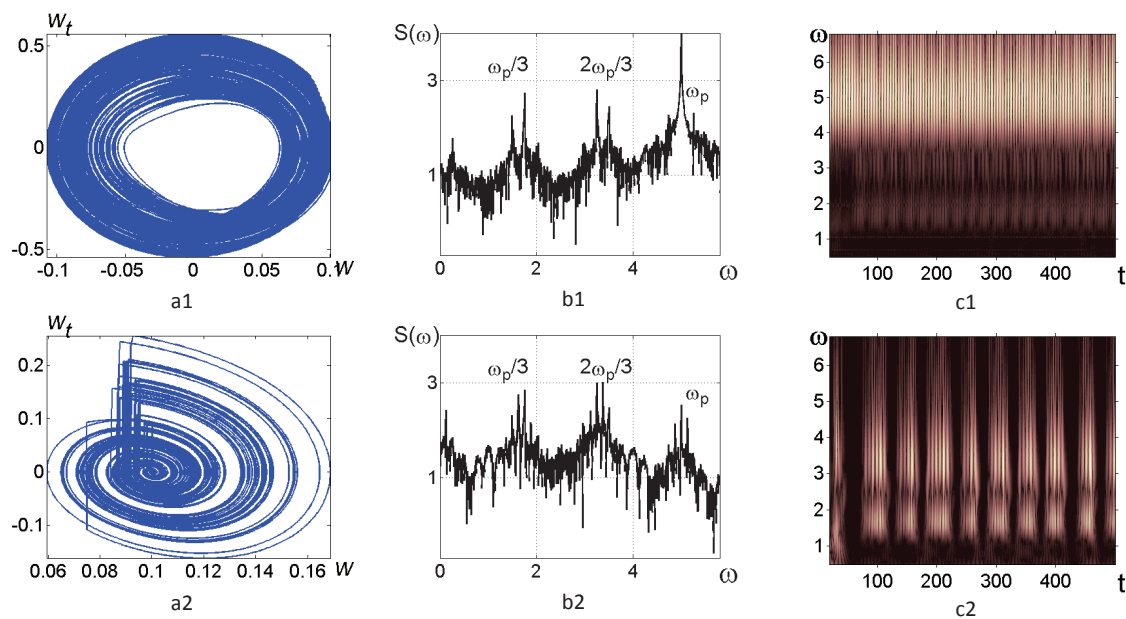


Рис. 5. Фазовый портрет (a1, a2), спектр мощности Фурье (b1, b2), 2D вейвлет-спектр (c1, c2) верхней пластины и первой балки ($y=0,25$) соответственно при амплитуде нагрузки $p_0=0,13$

Fig. 5. Phase portrait (a1, a2), FFT spectrum (b1, b2), 2D wavelet-spectrum (c1, c2) of the upper plate and the first beam ($y=0,25$) for $p_0=0,13$

утроением периода: $\omega_p/3=1,66$, $2\omega_p/3=3,33$ и $\omega_p=5$ (рис. 5, b1, b2). Колебания крайних балок ($y=0,25$ и $y=0,75$) – синхронные. На графиках 2D вейвлет-спектров Морле наблюдаются зоны включения/выключения частот (рис. 5, c1, c2). Фазовые портреты элементов системы представляют собой странные аттракторы (рис. 5, a1, a2). Старший показатель для верхней пластины по методу Вольфа равен 0,00090, по методу Розенштейна – 0,06404, по методу Канца – 0,02046. Для первой балки старший показатель Ляпунова по трем мето-

дам соответственно равен 0,01095, 0,05240, 0,00546. Таким образом, все характеристики указывают на хаотическое состояние системы.

При амплитуде продольной нагрузки $p_0=0,17$ в контактное взаимодействие вступают все элементы системы. Характер колебаний верхней и нижней пластин и первой балки ($y=0,25$) – хаотический. Для пластин доминирующей частотой является $\omega_p=5$, на 2D вейвлет-спектре для первой балки наблюдается весь спектр частот. Вторая ($y=0,5$) и третья ($y=0,75$) балки совершают непродолжи-

тельные по времени затухающие колебания на частоте $\omega_0=2,8$.

При дальнейшем увеличении интенсивности продольной нагрузки колебания всех элементов носят хаотический характер. Спектры мощности представляют собой сплошной пьедестал на доминирующей частоте $\omega_p=5$.

Заключение

Построена математическая модель вынужденных колебаний и контактного взаимодействия структуры, состоящей из двух пластин с внутренним набором ребер в виде n параллельных балок и зазорами между элементами. В ходе исследований удалось установить, что количество подкрепляющих балок между пластинами существенно влияет на контактное взаимодействие и сценарий перехода от гармонических колебаний к хаотическим. При контактном взаимодействии системы из двух пластин и двух балок (при их первом касании) сразу же происходят хаотические колебания на доминирующей частоте $\omega_p=5$, а при дальнейшем увели-

чении нагрузки появляется бифуркация Хопфа. При контактном взаимодействии системы из двух пластин и трех балок сразу же происходят хаотические колебания с утроением периода. А при увеличении амплитуды нагрузки хаотические колебания происходят на доминирующей частоте внешней нагрузки $\omega_p=5$. При хаотическом режиме в обеих задачах наблюдается явление перемежаемости частот. На отдельных интервалах времени хаос одного типа, а на других интервалах времени – другого типа, т. е. происходит смена интервалов времени с разными частотами и разными характеристиками колебаний. Результаты достоверны, так как получены с помощью различных методов определения показателя Ляпунова, и все остальные характеристики подтверждают наличие хаотического состояния.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-5609.2016.8 (в части проведения численного моделирования), грантов РФФИ (№ 16-08-01108а в части разработки алгоритмов и методов решения) и РФФИ (№ 16-01-00721а в части постановки задачи).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Haghighi H.S., Markazi A.H. Chaos prediction and control in MEMS resonators // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. – 2010. – № 15 (10). – P. 3091–3099.
2. Aghababa M.P. Chaos in a fractional-order micro-electro-mechanical resonator and its suppression // *Chinese Physics B*. – 2012. – № 21 (10). – P. 9.
3. Li G., Aluru N.R. Linear, nonlinear and mixed-regime analysis of electrostatic MEMS // *Sensor Actuator A: Physical*. – 2001. – № 91. – P. 278–291.
4. Zhang W.M., Meng G. Nonlinear dynamical system of micro-cantilever under combined parametric and forcing excitations in MEMS // *Sensor Actuator A: Physical*. – 2005. – № 119. – P. 291–299.
5. Amorim T.D., Dantas W.G., Gusso A. Analysis of the chaotic regime of MEMS/NEMS fixed-fixed beam resonators using an improved 1DOF model // *Nonlinear Dynamics*. – January 2015. – V. 79. – Iss. 2. – P. 967–981.
6. Иерархические тепловые модели бесплатформенной инерциальной навигационной системы на волоконно-оптических гироскопах / В.Э. Джашинов, В.М. Панкратов, А.В. Голиков, С.Г. Николаев, А.П. Колесов, А.Д. Плотников, К.В. Коффер // *Гироскопия и навигация*. – 2013. – № 1 (80). – С. 49–63.
7. Джашинов В.Э., Панкратов В.М., Барулина М.А. Математические модели термоупругого напряженно-деформированного состояния и погрешности масштабного коэффициента волоконно-оптического гироскопического датчика // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. – 2013. – № 2. – С. 43–52.
8. Меркурьев И.В., Подалков В.В. Динамика микромеханического и волнового твердотельного гироскопов. – М.: Физматлит, 2009. – 228 с.
9. Антуфьев Б.А. Дивергенция пластины, дискретно подкрепленной системой ребер // *Известия вузов. Авиационная техника*. – 2012. – № 1. – С. 64–66.
10. Игудисман О.С., Абрамович Х. Потеря устойчивости и критическое поведение пологих подкрепленных цилиндрических панелей // *Известия вузов. Авиационная техника*. – 2012. – № 4. – С. 11–14.
11. Сложные колебания и контактное взаимодействие пластины, подкрепленной балкой с зазором между ними, в условиях экстремальных режимов нагружения / Т.В. Яковлева, Е.Ю. Крылова, В.Г. Баженов, В.А. Крысько // *Известия вузов. Строительство*. – 2016. – № 3. – С. 13–23.
12. Noisy contact interactions of multi-layer mechanical structures coupled by boundary conditions / J. Awrejcewicz, V.A. Krysko-Jr., T.V. Yakovleva, V.A. Krysko // *Journal of Sound and Vibration*. – 2016. – № 369. – P. 77–86.
13. Контактное взаимодействие пластины с системой балок при наличии зазоров с учетом белого шума / Т.В. Яковлева, В.Г. Баженов, В.А. Крысько, Е.Ю. Крылова // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2015. – № 4. – С. 259–272.
14. Павлов С.П., Жигалов М.В. Сходимость одной итерационной процедуры решения уравнений Кармана–Власова–Муштари из теории оболочек // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. – 2012. – Т. 52. – № 9. – С. 1694–1699.
15. Лукаш П.А. Основы нелинейной строительной механики. – М.: Стройиздат, 1978. – 204 с.
16. Кантор Б.Я. Контактные задачи нелинейной теории оболочек вращения / АН УССР. Ин-т пробл. машиностроения. – Киев: Наук. думка, 1990. – 100 с.
17. Wavelet-Analysis-Based Chaotic Synchronization of Vibrations of Multilayer Mechanical Structures / V.A. Krysko, T.V. Yakovleva, V.V. Dobriyan, I.V. Papkova // *International Applied Mechanics*. – November, 2014. – V. 50. – № 6. – P. 706–720.
18. Deterministic Chaos in One Dimensional Continuous Systems / J. Awrejcewicz, V.A. Krysko, I.V. Papkova, A.V. Krysko // *Singapore: World Scientific*, 2016. – 562 p.
19. Determining Lyapunov exponents from a time series / A. Wolf, J.B. Swift, H.L. Swinney, J.A. Vastano // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. – 1985. – № D16. – P. 285–317.
20. Rosenstein M.T., Collins J.J., De Luca C.J. A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. – 1993. – № D65. – P. 117–134.
21. Kantz H. A robust method to estimate the maximal Lyapunov exponent of a time series // *Physics Letters*. – 1994. – № A185. – P. 77–87.

Поступила 28.09.2016 г.

Информация об авторах

Яковлева Т.В., кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики и моделирования физико-технического факультета Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина.

Крысько А.В., доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной математики и системного анализа физико-технического факультета Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина; программист научно-учебной лаборатории 3D-моделирования кафедры инженерной графики и промышленного дизайна Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кружилин В.С., студент физико-технического факультета Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина.

UDC 539.3

CONSTRAINED OSCILLATIONS AND CONTACT INTERACTION OF THE STRUCTURE, CONSISTING OF TWO PARALLEL PLATES WITH INTERNAL SET OF LOCAL RIBS, USED IN THE THEORY OF GYROSCOPES

Tatyana V. Yakovleva¹,
yan-tan1987@mail.ru

Anton V. Krysko^{1,2},
anton.krysko@gmail.com

Vadim S. Kruzhilin¹,
kruzhilin93@mail.ru

¹ Yuri Gagarin Saratov State Technical University,
77, Politeknicheskaya street, Saratov, 410054, Russia.

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

The relevance of the study is caused by the need to develop algorithmic methods for improving the reliability and accuracy of gyroscopic devices, which are used in oil and gas industry. Strength, accuracy and resistance to high temperature of the sensors are extremely important while drilling, to control spatial orientation of wells and downhole objects.

The aim of the work is to construct a mathematical model of the constrained oscillations and contact interaction of the structure consisting of two plates with the internal set of ribs and gaps between the elements, which will be used in the gyroscopes theory. To study such structural and nonlinear problems the authors have applied the methods of qualitative theory of differential equations, wavelet analysis, three methods (Wolf, Rosenstein, Kantz) for analyzing the sign of the highest Lyapunov exponent, numerical simulation using MATLAB software package. The solution was obtained by the Bubnov–Galerkin method in higher approximations in space coordinate and by the Runge–Kutta method of the 4th order of accuracy in time.

Results. The authors studied the effect of the number of ribs between the plates on character of their oscillations and contact interaction with longitudinal loading on the top plate, and identified the scenarios of transition of the system from harmonic into a chaotic state. The paper deals with two tasks: 1) the inner set of ribs consists of two beams, 2) the inner set of ribs consists of three beams. It was revealed that in chaotic regime in both tasks the frequency intermittency phenomenon is observed, that is changing time intervals with different frequencies and different oscillation modes. The reliability of the solution is provided by application of different methods for determining the highest Lyapunov exponent, by comparing the results obtained by the Bubnov–Galerkin method and the finite difference method.

Key words:

Distributed mechanical structures, contact interaction, small gaps, wavelet analysis, parametric oscillation, Lyapunov exponents.

The research was financially supported by the grant of the President of the Russian Federation MK-5609.2016.8 (numerical simulation), the grants of RFBR no. 16–08–01108a (development of algorithms and techniques of solution) and 16–01–00721a (statement of a problem).

REFERENCES

- Haghighi H.S., Markazi A.H. Chaos prediction and control in MEMS resonators. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2010, no. 15 (10), pp. 3091–3099.
- Aghababa M.P. Chaos in a fractional-order micro-electro-mechanical resonator and its suppression. *Chinese Physics B*, 2012, no. 21 (10), p. 9.
- Li G., Aluru N.R. Linear, nonlinear and mixed-regime analysis of electrostatic MEMS. *Sensor Actuator A: Physical*, 2001, no. 91, pp. 278–291.
- Zhang W.M., Meng G. Nonlinear dynamical system of micro-cantilever under combined parametric and forcing excitations in MEMS. *Sensor Actuator A: Physical*, 2005, no. 119, pp. 291–299.
- Amorim T.D., Dantas W.G., Gusso A. Analysis of the chaotic regime of MEMS/NEMS fixed–fixed beam resonators using an improved 1DOF model. *Nonlinear Dynamics*, vol. 79, no. 2, pp. 967–981.
- Dzhashitov E., Pankratov V.M., Golikov A.V., Nikolaev S.G., Kolevator A.P., Plotnikov A.D., Koffer K.V. Ierarkhicheskie teplovye modeli besplatformennoy inertsiyalnoy navigatsionnoy sistemy na volokonno-opticheskikh giroskopakh [Hierarchical thermal models of strapdown inertial navigation system on fogs]. *Giroskopy i Navigatsiya*, 2013, no. 1, pp. 49–63.
- Dzhashitov V.E., Pankratov V.M., Barulina M.A. Matematicheskie modeli termouprugogo napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i pogreshnosti masshtabnogo koeffitsienta volokonno-opticheskogo giroskopicheskogo datchika [Mathematical models of thermoelastic deflected mode and scale factor error of fiber optic gyro sensor]. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2013, no. 2, pp. 43–52.
- Merkurev I.V., Podalkov V.V. *Dinamika mikromekhanicheskogo i volnovogo tverdotelnogo giroskopov* [The dynamics of MEMS and wave solid-state gyroscopes]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 228 p.
- Antufev B.A. Divergentsiya plastiny, diskretno podkreplenny sistemoy reber [Divergence of a plate discretely supported by the stringer system]. *Russian Aeronautics*, 2012, no. 1, pp. 64–66.
- Igudisman O.S., Abramovich Kh. Poterya ustoychivosti i zakriticheskoe povedenie pologikh podkreplennykh tsilindricheskikh paneley [Buckling and post-buckling behavior of shallow supports]

- ted cylindrical panel]. *Russian Aeronautics*, 2012, no. 4, pp. 11–14.
11. Yakovleva T.V., Krylova E.Y., Bazhenov V.G., Krysko V.A. Complex modes and contact interaction of a plate supported with a beam with a gap in extreme loading modes. *News of higher educational institutions. Construction*, 2016, no. 3, pp. 13–23. In Rus.
 12. Awrejcewicz J., Krysko Jr. V.A., Yakovleva T.V., Krysko V.A. Noisy contact interactions of multi-layer mechanical structures coupled by boundary conditions. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, no. 369, pp. 77–86.
 13. Yakovleva T.V., Bazhenov V.G., Krysko V.A., Krylova C.Y. Contact interaction of a plate, reinforced by ribs, with gaps under the influence of white noise. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2015, no. 4, pp. 259–272. In Rus.
 14. Pavlov S.P., Zhigalov M.V. Skhodimost odnoy iteratsionnoy protsedury resheniya uravneniy Karmana–Vlasova–Mushtari iz teorii obolochek [The convergence of one iterative procedure for solving equations of Karman–Vlasov–Mushtari of the shells theory]. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2012, vol. 52, no. 9, pp. 1694–1699.
 15. Lukash P.A. *Osnovy nelineinoy stroitel'noy mekhaniki* [Fundamentals of nonlinear structural mechanics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978. 204 p.
 16. Kantor B.Ya. *Kontaknyye zadachi nelineinoy teorii obolochek vrashcheniya* [Contact problems of nonlinear theory of revolution shells]. Kiev, Ukrainian Academy of Sciences, Institute of Mechanical Engineering Problems, 1990. 100 p.
 17. Krysko V.A., Yakovleva T.V., Dobriyan V.V., Papkova I.V. Wavelet-Analysis-Based Chaotic Synchronization of Vibrations of Multilayer Mechanical Structures. *International Applied Mechanics*, 2014, vol. 50, no. 6, pp. 706–720.
 18. Awrejcewicz J., Krysko V.A., Papkova I.V., Krysko A.V. *Deterministic Chaos in One Dimensional Continuous Systems*. Singapore, World Scientific, 2016. 562 p.
 19. Wolf A., Swift J.B., Swinney H.L., Vastano J.A. Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1985, no. D16, pp. 285–317.
 20. Rosenstein M.T., Collins J.J., De Luca C.J. A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1993, no. D65, pp. 117–134.
 21. Kantz H. A robust method to estimate the maximal Lyapunov exponent of a time series. *Physics Letters*, 1994, no. A185, pp. 77–87.

Received: 28 September 2016.

Information about the authors

Tatyana V. Yakovleva, Cand. Sc., associate professor, Yuri Gagarin Saratov State Technical University.

Anton V. Krysko, Dr. Sc., professor, Yuri Gagarin Saratov State Technical University; programmer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vadim S. Kruzhilin, student, Yuri Gagarin Saratov State Technical University.

УДК 504.4.05:621.182.004 (571.16)

ОЦЕНКА АЭРОТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТЯХ УГОЛЬНЫХ И НЕФТЯНЫХ КОТЕЛЬНЫХ ПО СОСТОЯНИЮ СНЕГОВОГО ПОКРОВА (НА ПРИМЕРЕ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ)

Таловская Анна Валерьевна¹,
talovskaj@yandex.ru

Язиков Егор Григорьевич¹,
yazikoveg@tpu.ru

Шахова Татьяна Сергеевна¹,
tatyagnags29@yandex.ru

Филимоненко Екатерина Анатольевна¹,
filimonenkoea@mail.ru

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

Актуальность работы обусловлена необходимостью исследования слабо изученной специфики влияния локальных котельных, использующих различный вид топлива, на загрязнение прилегающей к ним территории.

Цель работы: качественная и количественная оценка уровня аэротехногенного загрязнения в окрестностях локальных угольной и нефтяной котельных по данным изучения микроэлементного состава твердой фазы снегового покрова.

Методы исследования: масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой, атомно-абсорбционная спектрометрия, сканирующая электронная микроскопия, статистические методы.

Результаты. Определено, что в окрестностях угольной котельной величина пылевой нагрузки превышает в 3 раза фоновую пылевую нагрузку и в 2 раза среднюю величину пылевой нагрузки для Томской области. В окрестностях нефтяной котельной пылевая нагрузка находится на уровне фона и средней величины для области. Техногенная геохимическая специализация твердой фазы снегового покрова в окрестностях угольной котельной проявляется в повышенных уровнях накопления (3–25 фона) и среднесуточного выпадения (3–125 фона) Cd, Sb, Mo, Pb, Sr, Ba, Ni, Mo, Zn и Co. Высокое относительно фона содержание данных микроэлементов в твердой фазе снегового покрова формирует средний уровень загрязнения и умеренно опасную экологическую ситуацию в окрестностях угольной котельной. Для твердой фазы снегового покрова из окрестностей нефтяной котельной специфичными элементами можно считать V, Ni и Sb, уровень накопления и среднесуточное выпадение этих элементов определено на уровне от 3 до 8 фонов. В окрестностях данной котельной сформирован низкий уровень загрязнения и неопасная экологическая ситуация по уровню накопления микроэлементов в твердой фазе снегового покрова по сравнению с фоном. Величина суммарного показателя имиссии микроэлементов статистически значимо выше в окрестностях угольной котельной по сравнению с аналогичным показателем в окрестностях нефтяной котельной. Исследование проб с помощью сканирующей электронной микроскопии позволило определить металлсодержащие фазы некоторых выявленных элементов-индикаторов, по размерам относящиеся к крупным (размером от 2,5 до 10 мкм) и мелким (размером менее 2,5 мкм) частицам, способные проникать в респираторные органы человека.

Выводы. Сравнительный анализ показал, что в окрестностях угольной котельной сформирована более опасная экологическая ситуация по сравнению с окрестностями нефтяной котельной. Это связано не только с деятельностью самой угольной котельной, но и с ветровым переносом от открытого угольного склада. Выявленные элементы-индикаторы, а также их металлсодержащие фазы в твердой фазе снегового покрова с высокой долей вероятности отражают геохимическую специализацию используемого топлива, зольных уносов котельных, особенности сгорания топлива, а также могут быть связаны с физико-химическими процессами в атмосферном воздухе и снеговом покрове. Определенные элементы-индикаторы и их металлсодержащие фазы в твердой фазе снегового покрова могут использоваться при идентификации источников загрязнения.

Ключевые слова:

Снеговой покров, микроэлементы, угольная котельная, нефтяная котельная, техногенез, металлсодержащие фазы.

Введение

Одним из главных антропогенных источников выбросов является сжигание ископаемого топлива (уголь, нефть, мазут, природный газ). В связи с тем, что объекты теплоэнергетики, использующие уголь, находятся на первом месте по объемам выбросов твердых частиц, а использующие жидкое топливо – на втором месте [1, 2], актуальным является изучение размеров и состава выбрасываемых частиц. В настоящее время основное внимание уделяется изучению выбросов объектов теплоэнергетики, которые расположены на промышленно-урбанизированных терри-

ториях. Во время сжигания различных типов топлива выбрасываются твердые частицы с различным химическим составом и размером, зависящие от условий сжигания и химического состава топлива [3]. В результате сжигания ископаемого топлива в атмосферный воздух поступают преимущественно мелкие (диаметр менее 2,5 мкм) и ультрамелкие (диаметр менее 0,1 мкм) частицы [1], содержащиеся в своем составе токсичные микроэлементы [4–6]. Они способны проникать в легкие и оказывать серьезное воздействие на респираторную, сердечно-сосудистую и нервную системы [7–9].

На сегодняшний день менее изученным остается вопрос об уровне аэротехногенного загрязнения в окрестностях локальных котельных, расположенных в сельских населённых пунктах и являющихся основными источниками загрязнения воздуха в этих местах. Хотя сельские котельные являются маломощными котельными, однако поступление твердых выбросов достигает несколько десятков тонн в год. Например, было рассчитано, что количество валовых выбросов твердых частиц от сжигания угля изменяется от 10,2 до 81,8 т/год в зависимости от установленной мощности локальных котельных в Томской области [10]. Анализ химического состава и форм нахождения токсичных микроэлементов в выбросах, поступающих от локальных котельных, на данный момент не осуществляется. Следовательно, появляется необходимость получения новых данных об элементах-индикаторах техногенного воздействия маломощных локальных котельных, использующих различные виды топлива.

Для восполнения пробела такого рода исследований нами в качестве модельных объектов были выбраны угольная и нефтяная котельные, расположенные в районах Томской области. Выбор обоснован тем, что в большинстве сельских населённых пунктов области теплоснабжение обеспечивается котельными, на которых используется в основном уголь и нефть. В данной работе для анализа были выбраны As, Hg, Cd, Se, Pb, Zn, Co, Ni, Mo, Cu, Sb, Cr, Ba, V, Mn, Sr и W как наиболее токсичные элементы согласно российскому общетоксикологическому ГОСТу 17.4.1.02.83 [11] и Программе ООН по окружающей среде (ЮНЕП).

Снеговой покров является одним из наиболее информативных объектов при выявлении аэротехногенного загрязнения территории, что показано многими авторами [12–16], а также нашими исследованиями в окрестностях различных предприятий г. Томска и на территории сельских населённых пунктов Томской области [17–21].

Для получения новых данных качественной и количественной оценки уровня аэротехногенного загрязнения в окрестностях локальных угольной и нефтяной котельных на основе изучения снегового покрова нами решались следующие задачи: 1) определение уровня пылевой нагрузки в окрестностях изучаемых котельных; 2) выявление экологически наиболее опасных элементов-загрязнителей (элементов-индикаторов), имеющих максимальные величины выпадения и накопления в твердой фазе снегового покрова в зависимости от типа используемого топлива; 3) определение металлосодержащих фаз и их морфологических характеристик; 4) установление уровня загрязнения микроэлементами в окрестностях угольной и нефтяной котельных.

Характеристика объектов исследований

Для получения информации о составе твердой фазы снегового покрова нами были выбраны ко-

тельные, расположенные в населённых пунктах Асиновского и Шегарского районов Томской области. В населённом пункте Асиновского района, где проводились исследования, расположена только угольная котельная, которая обслуживает три объекта: школу, гараж и административное здание. В технологическом процессе котельной используется уголь Кузнецкого бассейна. Высота трубы составляет 20 м. Количество котлов – 2 шт. Расход топлива в год – 416 т. Фактическая годовая выработка тепла – 7700 Гкал/год. В населённом пункте Шегарского района, где проводились исследования, расположена только нефтяная котельная, обслуживающая психоневрологический интернат. Котельная функционирует на сырой нефти, поступающей с молчановской НПС, которая входит в состав нефтепровода Александровское–Анжеро-Судженск. Высота трубы составляет 24 м. Количество котлов – 2 шт. Выработка тепловой энергии – 6674 Гкал/год.

С метеорологических позиций выбросы вышеобозначенных котельных распространяются на частный сектор и близко расположенные объекты социальной инфраструктуры согласно преобладающему направлению ветра. Особенности циркуляции атмосферы обуславливают преобладание юго-западных и южных ветров. Зимой в области господствуют ветры южной четверти: южные, юго-восточные и юго-западные.

Методика исследования

Отбор проб снегового покрова проводили в конце февраля 2016 г., до периода снеготаяния. Выбор пунктов отбора проб снегового покрова осуществляли в соответствии с нормативным документом [22]. Расположение пунктов отбора проб обусловлено следующими факторами: 1) преобладающее направление ветра; 2) высота трубы котельной; 3) доступность к месту отбора; 4) неизменный снеговой покров; 5) удаленность на 20–30 м от дорог для исключения влияния выбросов автотранспорта; 6) удаленность от домов с печным отоплением для исключения их влияния. Все пункты отбора проб в окрестностях изучаемых котельных были расположены за пределами границ промышленной территории котельных.

В окрестностях угольной котельной пункты отбора проб были расположены в северо-восточном направлении на расстоянии 50, 120 и 210 м от труб котельной; северном – 30, 100 и 200 м; северо-западном – 100 и 230 м; юго-восточном – 100 и 250 м и юго-западном – 100 и 180 м (рис. 1, а). Следует отметить, что пункт отбора проб в 50 м в северо-восточном направлении от котельной был расположен во дворе школы, а пункт отбора в 30 м в северном направлении – вблизи открытого угольного склада. Всего было отобрано 12 проб снегового покрова.

В окрестностях нефтяной котельной пункты отбора были расположены в северо-восточном направлении на расстоянии 50, 150 и 250 м от труб

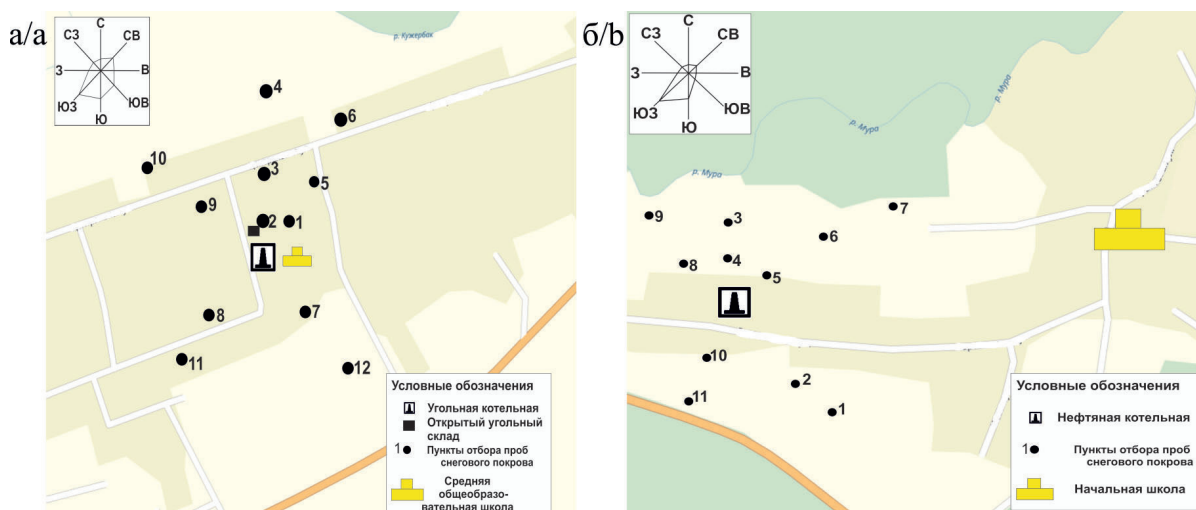


Рис. 1. Схема отбора проб снега в окрестностях: а) угольной котельной; б) нефтяной котельной (карты 2GIS, с дополнениями авторов)

Fig. 1. Location of snow sampling in the vicinity of: a) coal-fired boiler house; b) oil-fired boiler house (map 2GIS with additions of the authors)

котельной; северном – 50 и 150 м; северо-западном – 100 и 200 м; юго-восточном – 200 и 300; южном – 100 и 200 м (рис. 1, б). Всего было отобрано 11 проб снегового покрова.

Отбор и подготовку проб снега проводили в соответствии с нормативным документом [22], опубликованными работами различных исследователей [12, 13, 15, 23] и с учетом нашего опыта работы [17–21]. Пробы снега отбирали методом шурфа на всю глубину снегового покрова за исключением 5-см слоя над почвой. Вес проб изменялся от 16 до 18 кг. Пробы помещали в полиэтиленовые пакеты и доставляли в лабораторию, где помещали в пластиковые контейнеры и растапливали при комнатной температуре в течение суток. Затем часть отстоянной чистой снеговой воды (5–6 л) сливалась, тогда как оставшаяся часть воды была профильтрована через беззольные фильтры типа «синяя лента» для получения твердой фазы снегового покрова. Эта фаза представляет собой взвешенные частицы в снеговой воде. Затем на фильтре твердая фаза была просушена при комнатной температуре, просеяна через сито с диаметром ячейки 1 мм и взвешена.

Для анализа на элементный состав были подготовлены пробы, максимально приближенные к изучаемым котельным: 8 проб из окрестностей угольной котельной и 7 проб – нефтяной котельной. Содержание As, Cd, Se, Pb, Zn, Co, Ni, Mo, Cu, Sb, Cr, Ba, V, Mn, Sr и W в пробах было определено методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) в аккредитованной лаборатории Химико-аналитического центра «ПЛАЗМА» (г. Томск). Исследования выполняли на масс-спектрометре Elan DRC-E фирмы PerkinElmer Instruments LL S (США). Точность анализа ICP-MS соответствует 5 % при высокой правильности, обеспечиваемой контрольными измерениями госу-

дарственных стандартных образцов состава (ГСО) и аттестованными методиками анализа.

Содержание Hg в пробах определяли атомно-абсорбционной спектроскопией (метод пиролиза) в лаборатории микроэлементного состава природных сред МИНОЦ «Урановая геология» (ТПУ, г. Томск). Измерения проводили на атомно-абсорбционном спектрометре РА-915+ («ЛЮМЭКС», Россия) с помощью пиролизической приставки ПИРО-915, с зеемановской коррекцией с использованием пакета программ RA915P (ПНД Ф 16.1:2.23–2000). Граница относительной погрешности измерений составила 25 %.

В пробах для выявления металлосодержащих частиц и их морфологических особенностей использовали метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Исследования выполняли в лаборатории электронно-оптической диагностики МИНОЦ «Урановая геология» на электронном сканирующем микроскопе (S-3400N фирмы Hitachi, Япония) с энергодисперсионной приставкой для микроанализа (Bruker XFlash 4010, Германия) для проведения рентгеноспектрального анализа. Элементный состав частиц определяли с помощью программы EDAX Esprit, которая основана на полуквантовом элементном анализе с 10–15%-й ошибкой анализа в зависимости от определяемого элемента.

Методика обработки данных, согласно работам [12, 13, 23], включала расчеты следующих показателей: пылевая нагрузка (P_n , мг/м² в сутки) – по формуле $P_n = P_o / St$, где P_o – масса взвеси на фильтре, мг; S – площадь шурфа, м²; t – время от даты снегопада до даты отбора проб, сутки; величина среднесуточного выпадения каждого микроэлемента на поверхность снегового покрова ($P_{общ}$, мг/км² в сутки) – по формуле $P_{общ} = C \cdot P_n$, где C – концентрация элемента в пробе твердой фазы снегово-

го покрова, мг/кг. Для выявления аномального содержания микроэлементов и их среднесуточного выпадения над фоном определяли, соответственно, коэффициент концентрации (K_c) по формуле $K_c = C/C_\phi$ и коэффициент превышения выпадений над фоном (K_p) по формуле $K_p = P_{\text{общ}}/P_\phi$. В качестве локальных фоновых значений использовали полученные нами ранее данные на полигоне «Фоновый» Института оптики атмосферы СО РАН (г. Томск), в 70 км от г. Томска [19, 20].

Атмотехногенную нагрузку на изучаемые территории оценивали двумя суммарными показателями – загрязнение снегового покрова элементами Z_c и имиссии элементов Z_p (потока элементов из атмосферы), которые представляют собой сумму K_c и K_p соответственно: $Z_c = \sum K_c - (n-1)$; $Z_p = \sum K_p - (n-1)$, где n – число химических элементов в данной выборке с аномальной величиной K_c или K_p (с учетом флуктуаций фона в качестве аномального обычно принимается значение $\geq 1,5$). При условии K_c или $K_p \geq 1,5$ источником элемента являются локальные объекты, а в противоположном случае – региональные. Степень экологической опасности загрязнения территории определяли в зависимости от значений Z_c и Z_p для твердой фазы снегового покрова и пылевой нагрузки P_n согласно градациям [12, 23] с изменениями [13].

При выполнении аналитических исследований содержания некоторых элементов в пробах были определены в концентрациях ниже предела обнаружения анализа. Такие значения заменялись величиной половины предела обнаружения анализа. Аномальные содержания W в пробе из окрестностей нефтяной котельной, V и Sb в пробах из окрестностей угольной котельной были заменены на средние значения по выборке, чтобы избежать оценки точечного загрязнения и искусственного завышения среднего содержания элемента в выборке.

Статистическая обработка и анализ данных проводили посредством программного обеспечения STATISTICA 7.0 и Microsoft Excel. Корреляция между содержанием микроэлементов в пробах характеризовалась ранговым коэффициентом корреляции Спирмена. Оценка различий двух выборок по вышеуказанным эколого-геохимическим показателям проводилась с помощью критериев Колмогорова–Смирнова и Манна–Уитни [24]. Определение элементов-индикаторов в твердой фазе снегового покрова из окрестностей угольной и нефтяной котельных проводилось по эколого-геохимическим показателям – K_c и K_p (значения ≥ 3 [12, 23]), а также по величине уровня значимости различия двух выборок по содержанию микроэлементов в твердой фазе снегового покрова и среднесуточного выпадения микроэлементов согласно работе [24]. Степень значимости отличия двух выборок по сравниваемым параметрам распределения качественно определяется по уровню значимости (p-level): не значимые (p-level $\geq 0,100$), слабо значимые ($0,100 > \text{p-level} \geq 0,050$), статистически зна-

чимые ($0,050 > \text{p-level} \geq 0,010$), сильно значимые ($0,010 > \text{p-level} \geq 0,001$), высоко значимые ($0,001 > \text{p-level}$) различия [24].

Результаты и их обсуждение

Угольная котельная

Анализ данных показал, что в окрестностях угольной котельной величина пылевой нагрузки изменяется от 5,2 до 112, при средней величине 24,4 мг/м² в сутки (рис. 2). Минимальные величины пылевой нагрузки были выявлены в пунктах отбора, расположенных в юго-западном и юго-восточном направлениях от труб котельной. Максимальные величины пылевой нагрузки приходятся на пункт отбора проб во дворе школы, а именно в 50 м на северо-восток от трубы котельной (82,2 мг/м² в сутки), а также в 30 м на север от трубы, где также расположен открытый склад угля (112 мг/м² в сутки). Средняя величина пылевой нагрузки в 3 раза превышает локальный (6,1 мг/м² в сутки [20]) и региональный фон (7 мг/м² в сутки [17]), в 2 раза – среднюю величину для области (11,0 мг/м² в сутки [20]) и соответствует низкому уровню загрязнения согласно нормативной градации (< 200 мг/м² в сутки [12, 13, 23]).

Величина пылевой нагрузки превышает локальный и региональный фон в 11 и 16 раз в пунктах отбора проб в 50 м в северо-восточном и 30 м в северном направлениях от трубы котельной, вблизи угольного склада.

В пробах твердой фазы снегового покрова из окрестностей угольной котельной проявляется вариабельность содержания элементов (рис. 3, а), что может свидетельствовать о наличии точечных аномалий с очень высоким содержанием элементов. В пробах было определено, что Sb ($K_c=24,8$), а также Cd, Sr, Ba и Zn составляют группу элементов с высоким накоплением элементов ($K_c=3,0...7,2$) по средним значениям коэффициентов концентрации (табл. 1). Максимальные накопления Sb ($K_c=27,9...37,7$) были определены в пробах, отобранных в 30, 100 и 200 м на север от труб котельной. Кроме того, в пункте отбора в 30 м от труб также расположен открытый угольный склад. В пробах, отобранных в 30 и 100 м на север от труб котельной, также выявлено повышенное накопление Cd ($K_c=8,9$ и $8,7$ соответственно) и Ba ($K_c=5,2$ и $5,7$). В пробах, отобранных в 50 м на северо-восток и 30 м на север от трубы котельной, было определено высокое накопление Ni ($K_c=6,2$ и $4,7$ соответственно), Sr ($K_c=7,1$ и $7,8$), Mo ($K_c=4,4$ и $4,8$), Ba ($K_c=5,7$ и $5,2$), Co ($K_c=5,2$ и $5,2$).

Суммарный показатель загрязнения составляет в среднем 47,8, что соответствует среднему уровню загрязнения и умеренно опасной для здоровья человека экологической ситуации ($Z_c=32...64$ [12, 13, 23]). Наибольший вклад в загрязнение вносят Sb, Cd, Sr, Ba и Zn. Максимальные значения Z_c в пределах того же уровня загрязнения характерны для следующих пунктов отбора: в 30 м на север от труб котельной, где еще расположен от-

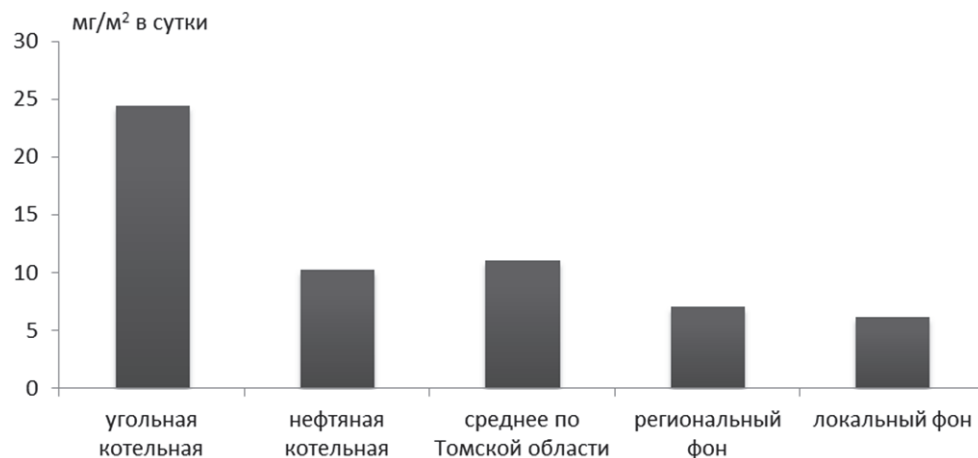


Рис. 2. Величина пылевой нагрузки в окрестностях угольной и нефтяной котельных (среднее по Томской области, локальный фон [20], региональный фон [17])

Fig. 2. Dust load in the vicinity of coal-fired and oil-fired boiler houses (average value for Tomsk region and local background according [20] and region background according [17])

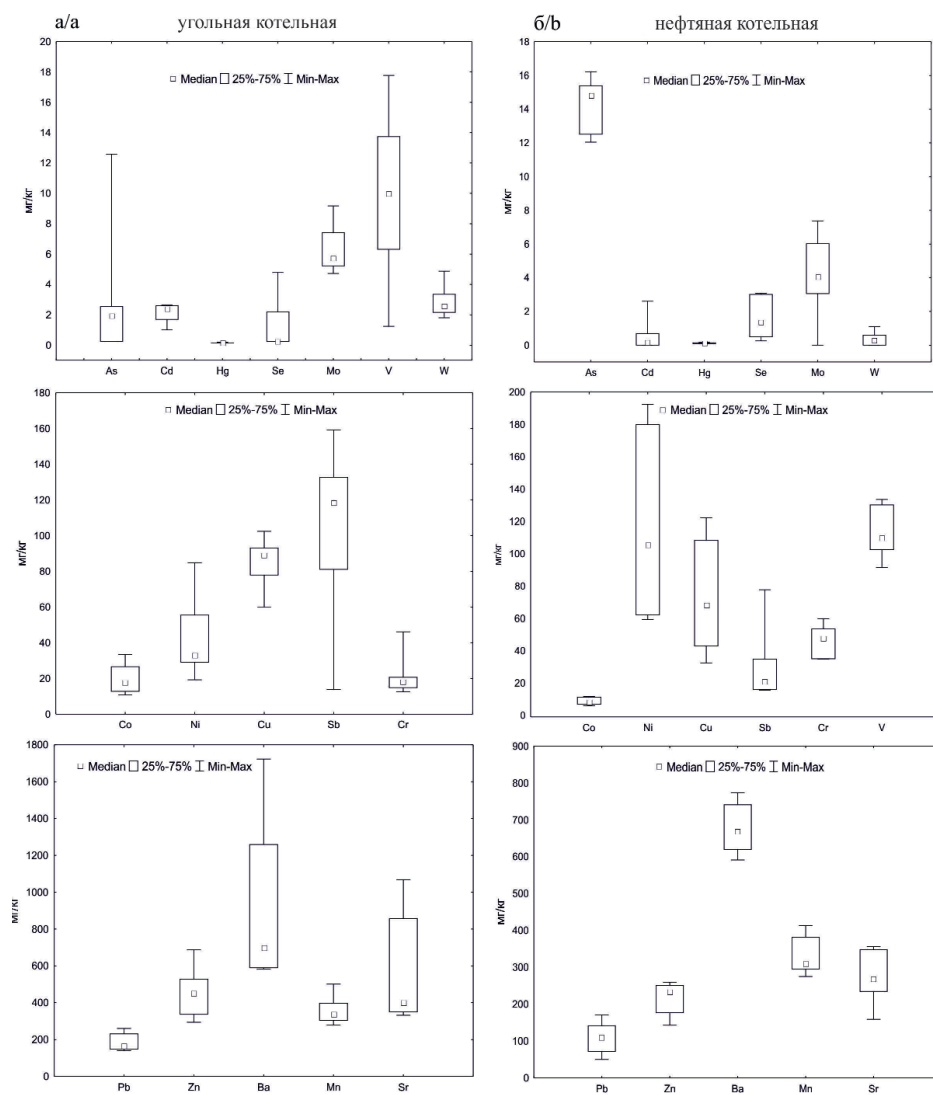


Рис. 3. Диаграммы размаха содержания микроэлементов в пробах твердой фазы снежного покрова в окрестностях: а) угольной котельной; б) нефтяной котельной

Fig. 3. Diagrams of trace elements concentration in solid phase of snow in the vicinity of: а) coal-fired boiler house; б) oil-fired boiler house

крытый склад угля, и 200 м на север от труб (62,9 и 60,0 соответственно).

Наибольшие превышения среднего значения среднесуточного выпадения элементов над фоном наблюдаются для Sb ($K_p=120$), а также для Sr, Mo, Cd, Ni, Ba, Zn и Co ($K_p=21,7...38,7$) (табл. 2). Значения среднесуточного выпадения данных элементов неоднородны в окрестностях котельной (рис. 4, а). Например, среднесуточное выпадение Sb изменяется от 8,6 до 540 мг/км² в сутки. Меньшее значение K_p (от 3,4 до 11,9) определено для остальных элементов. Только среднесуточное выпадение Se не превышает фоновое значение.

Суммарный показатель имиссии элементов, определяемый величиной Z_p , составляет 349 и соответствует низкому уровню загрязнения с неопасной экологической ситуацией ($Z_p < 1000$ [12, 13, 23]). Наибольший вклад в данный показатель вносит среднесуточное выпадение Sb, Sr, Mo, Cd, Ni, Ba, Zn и Co. Средний уровень загрязнения с умеренно опасной экологической ситуацией ($Z_p=1443$) характерен для пункта отбора в 100 м на север от труб котельной и сформировано за счет высокого относительно фона среднесуточного выпадения Sb ($K_p=539$), Cd ($K_p=172$), Sr ($K_p=150$), Co и Ba ($K_p=100$).

По результатам корреляционного анализа в пробах были выявлены коэффициенты корреляции (r) между некоторыми парами элементов ($r > 0,7$), что свидетельствует о сильной взаимосвязи этих элементов и предполагает их единый источник поступления (табл. 3).

Например, типичный элемент Ba в выбросах от сжигания угля [8] образует сильные связи с Ni, Sr и Co. Также Ni образует сильные связи с Pb, Sr и Co, а Sr – с Co. Следует отметить, что значения $K_c=3$ для Ba, Ni и Co и $K_c=4$ для Sr. Видимо, этим также можно объяснить ассоциации между этими элементами. Обращает на себя внимание сильная

отрицательная связь между Pb и Mo, Se и V, Se и W, что может свидетельствовать о разных источниках их поступления.

Изучение проб, отобранных в 30 и 50 м от котельной, где расположена также и школа, с помощью СЭМ позволило выявить в них некоторые металлосодержащие фазы (табл. 4). В пробах были обнаружены частицы сульфата Ba, сульфида Pb и сульфида Cu. Кроме того, Ba был выявлен в качестве примеси в Al-Si-сферулах (рис. 5, а) и шлаковых алюмосиликатных частицах. Стоит отметить, что Al-Si-сферулы являются типичными частицами в выбросах угольных теплоэлектростанций, также Al-Si сферулы с примесями Ba и Fe были выявлены в составе мелких выбрасываемых частиц [6]. Обнаружена шлаковая частица с сульфидом Zn (рис. 5, б). На поверхности алюмосиликатной частицы была выявлена частица, содержащая Pb, Fe и Ti. В пробах присутствуют частицы неправильной формы интерметаллического состава: Fe, Cr, Ni и Fe, Cr, Ti. Выявленные металлосодержащие фазы возможно использовать как индикаторные для твердой фазы снегового покрова в окрестностях угольных котельных.

Нефтяная котельная

Величина пылевой нагрузки изменяется от 3,4 до 14,2, при средней величине 10,2 мг/м² в сутки в окрестностях нефтяной котельной (рис. 2). Минимальные величины данного показателя соответствуют пунктам отбора в юго-восточной части, а максимальная величина – пунктам в северо-восточной части, на расстоянии 150 м от труб котельной. Средняя величина пылевой нагрузки сопоставима с величиной локального фона (6,1 мг/м² в сутки [20]) и регионального фона (7 мг/м² в сутки [17]), а также со средней величиной для Томской области (11,0 мг/м² в сутки [20]). Согласно норма-

Таблица 1. Геохимическая характеристика твердой фазы снегового покрова в окрестностях угольной и нефтяной котельных
Table 1. Geochemical characteristics of solid phase of snow in the vicinity of coal-fired boiler and oil-fired boiler houses

Котельная Boiler house	Коэффициент концентрации, K_c Coefficient of concentration, K_c			Z_c
	$\geq 1,5$	1,6–5	5–25	
Угольная котельная Coal-fired boiler house	Se _{0,1} As _{0,3} V _{0,4} Cr _{0,5} Cu _{0,8} W _{1,1} Mn _{1,5}	Hg _{1,9} Pb _{2,4} Ba ₃ Co _{3,1} Ni _{3,1} Zn _{3,2} Mo _{3,3} Sr _{4,2}	Cd _{7,2} Sb _{24,8}	47,8
Нефтяная котельная Oil-fired boiler house	Se _{0,1} W _{0,1} Cu _{0,7} Cr _{1,1} Pb _{1,4} As _{1,4} Co _{1,4} Hg _{1,5} Mn _{1,5} Zn _{1,5}	Sr ₂ Cd ₂ Mo _{2,2} Ba _{2,2} V _{4,8}	Sb _{7,0} Ni _{8,4}	23,1

Таблица 2. Интенсивность среднесуточного выпадения микроэлементов на снеговой покров в окрестностях угольной и нефтяной котельных
Table 2. Daily average deposition of trace elements on snow cover in the vicinity of coal-fired and oil-fired boiler houses

Котельная Boiler house	Коэффициент превышения среднесуточного выпадения элементов над фоном, K_p Coefficient ratio of daily deposition of trace elements in sampling site to background, K_p					Z_p
	$\geq 1,5$	1,6–5	5–15	15–30	≥ 30	
Угольная котельная Coal-fired boiler house	Se _{0,4}	As _{2,5} V _{3,4} Cr _{3,6} Hg _{4,4} Cu _{4,5}	W _{6,0} Mn _{8,9} Pb _{11,9}	Zn _{21,7} Mo _{23,4} Co _{25,6} Ba _{26,1} Ni _{27,0}	Sr _{36,5} Cd _{38,7} Sb ₁₂₀	349
Нефтяная котельная Oil-fired boiler house	Se _{0,2} W _{0,2} Cu _{0,7} Cr _{1,2} As _{1,5} Co _{1,5} Pb _{1,5} Hg _{1,5}	Mn _{1,7} Zn _{1,8} Cd _{2,0} Sr _{2,1} Mo _{2,3} Ba _{2,6}	V _{5,4} Sb _{8,6} Ni _{8,8}	–	–	28,4

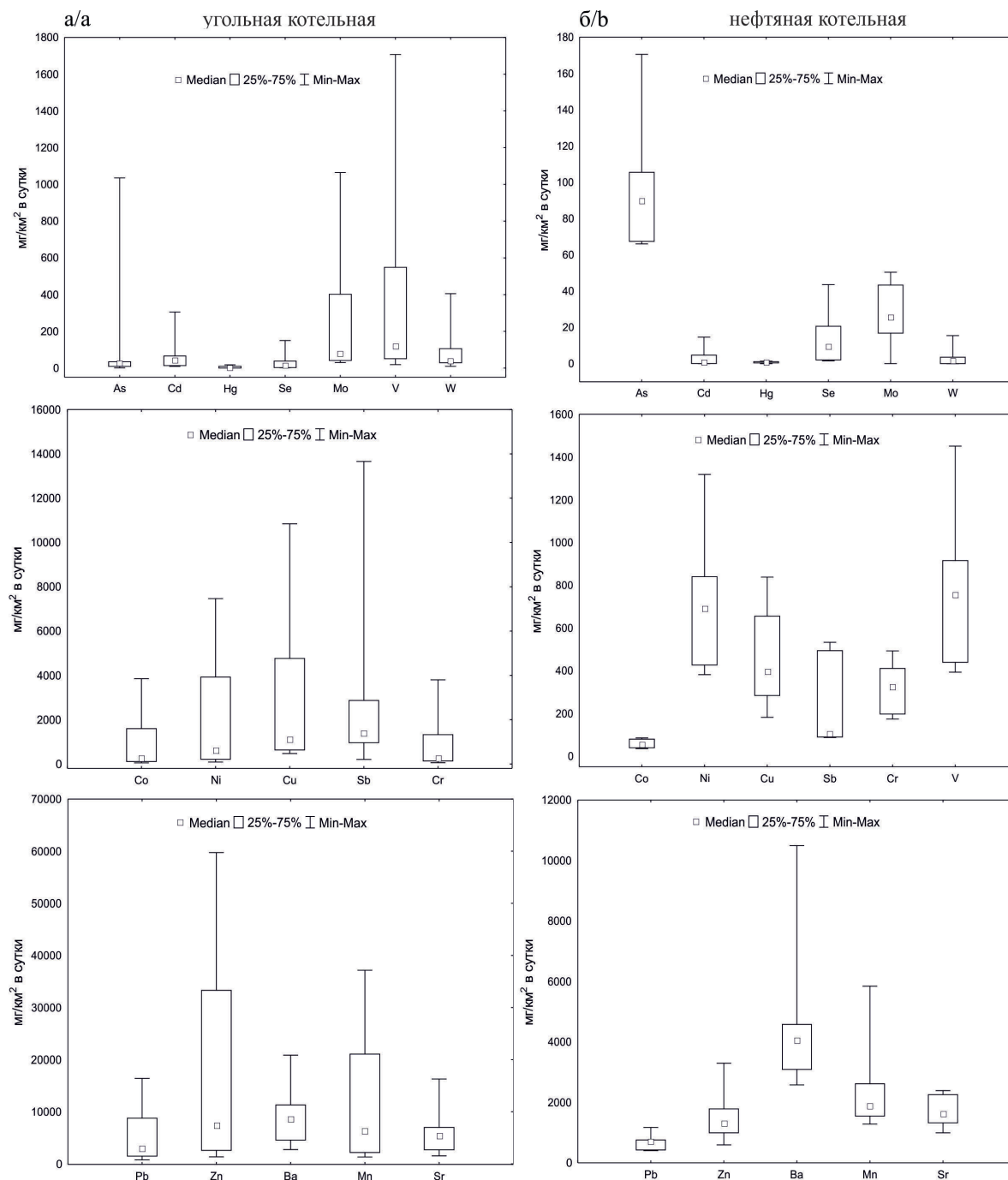


Рис. 4. Диаграммы размаха среднесуточного выпадения микроэлементов на снеговой покров в окрестностях: а) угольной котельной; б) нефтяной котельной

Fig. 4. Diagrams of daily average deposition of trace elements on snow cover in the vicinity of: а) coal-fired boiler house; б) oil-fired boiler house

тивной градации средняя величина пылевой нагрузки соответствует низкому уровню загрязнения ($< 200 \text{ мг/м}^2 \text{ в сутки}$ [12, 13, 23]).

Содержание Ni, Sb и V в пробах твердой фазы снегового покрова неоднородно, что можно видеть на диаграммах размаха (рис. 3, б). По средним значениям коэффициентов концентрации Ni, Sb и V

составляют группу элементов с высоким накоплением ($K_c=4,8\ldots 8,0$) в твердой фазе снегового покрова (табл. 1).

Менее активно в пробах твердой фазы снегового покрова накапливаются Sr, Mo, Cd и Ba ($K_c=2,0\ldots 2,2$), тогда как содержание остальных элементов (Cr, Mn, Co, Cu, Zn, As, Se, W, Pb и Hg)

близко к значениям локального фона. Максимальные накопления Ni были выявлены в пробах, отобранных в 50 м на север и 50 м на северо-восток от труб котельной, значение K_c составило 13,2 и 14,1 соответственно. В пробе, отобранной в 50 м на северо-востоке, также было выявлено максимальное накопление Sb ($K_c=18,4$). Накопление V находится на одном уровне ($Z_c=3,8...5,3$) в изучаемых пробах.

Суммарный показатель загрязнения составляет 23,1, что соответствует низкому уровню загрязнения с неопасной экологической ситуацией ($Z_c<32$ [12, 13, 23]). Среднее загрязнение с умеренно опасной экологической ситуацией ($Z_c=46,2$) выявлено в пункте отбора в 50 м на северо-восток от труб котельной. Основной вклад в эту величину вносят высокие уровни накопления относительно фона Sb, Ni и V.

Таблица 3. Ассоциации микроэлементов в твердой фазе снегового покрова в окрестностях угольной и нефтяной котельных

Table 3. Associations of trace elements in solid phase of snow in the vicinity of coal-fired and oil-fired boiler houses

Котельная Boiler house	Ассоциация, положитель- ные связи (коэффициент корреляции) Association, positive relation (correlation coefficient)	Ассоциация, отрицатель- ные связи (коэффициент корреляции) Association, negative relation (correlation coefficient)	Не ассоциируются No association
Угольная котельная Coal-fired boiler house	Zn-Ni (0,86); Co-Ni (0,9); Cr-Zn (0,71); Ba-Co (0,9); Sr-Co (0,97); Ni-Pb (0,85); Ni-Ba (0,85); Ni-Sr (0,88); Mo-Cu (0,71); Sr-Ba (0,88); V-W (0,8)	Pb-Mo (0,74); Se-V (0,86); Se-W (0,79)	Hg, Sb, Mn
Нефтяная котельная Oil-fired boiler house	As-Pb (0,85); Cu-Pb (0,78); As-Co (0,78); No-Co (0,89); Cu-Co (0,92); Cr-Co (0,92); Mo-Ni (0,85); Cr-Ni (0,82); Cr-Cu (0,92); Sb-Mn (0,89)	–	Cd, Hg, Se, Zn, Ba, V, Sr, W

К элементам с высоким среднесуточным выпадением относительно фоновых значений относятся Ni, Sb и V ($K_p=5,4...8,8$) (табл. 2). Среднесуточное выпадение Ni изменяется от 427 до 1318, Sb – от 87 до 533 и V – от 393 до 1451 мг/км² в сутки (рис. 4, б). Значительно меньший K_p (от 2,1 до 2,6) зафиксирован для Sr, Mo, Cd и Ba, тогда как среднесуточное выпадение остальных элементов соответствует фоновым значениям. Суммарный показатель имиссии элементов (Z_p) составляет в среднем 28,4, что соответствует низкому уровню загрязнения и неопасной экологической ситуации ($Z_p<1000$ [12, 13, 23]).

Корреляционный анализ позволил выделить некоторые парные ассоциации элементов, видимо имеющих единый источник поступления (табл. 3). Например, типичный элемент Ni, содержащийся в нефти [25] и в выбросах сжигания нефти [5], образует сильно значимые связи с Co, Mo и Cr в изучаемых пробах. Также Co образует сильную положительную связь с Cr. Следует отметить, что Ni образовал сильные связи с элементами, содержание которых близко к фоновым значениям, т. е. элементы с $K_c=1,1...1,4$. Установлено также, что Sb со значением $K_c=18,4$ образует сильную связь с Mn со значением $K_c=1,5$. Вероятно, такие ассоциации элементов можно связать с вкладом как локальных, так и региональных источников поступления данных элементов. Например, Cr можно отнести к общерайонной специфике состава твердой фазы снегового покрова, поскольку ранее нами [18] были определены высокие концентрации данного элемента в твердой фазе снегового покрова в населенных пунктах Шегарского района.

По результатам СЭМ изучения проб, отобранных на расстоянии 50 м от котельной, было выявлено, что V и Ni содержатся в качестве примеси вместе с Ti в ферросферулах (табл. 5). Также были обнаружены алюмосиликатно-кальциевые частицы с примесями V, Ti, Cr и Zr (рис. 6, а), алюмосиликатные частицы с содержанием V, Ni и Fe (рис. 6, б) и с примесями V, Ni, Fe и Ti. Фазы, со-

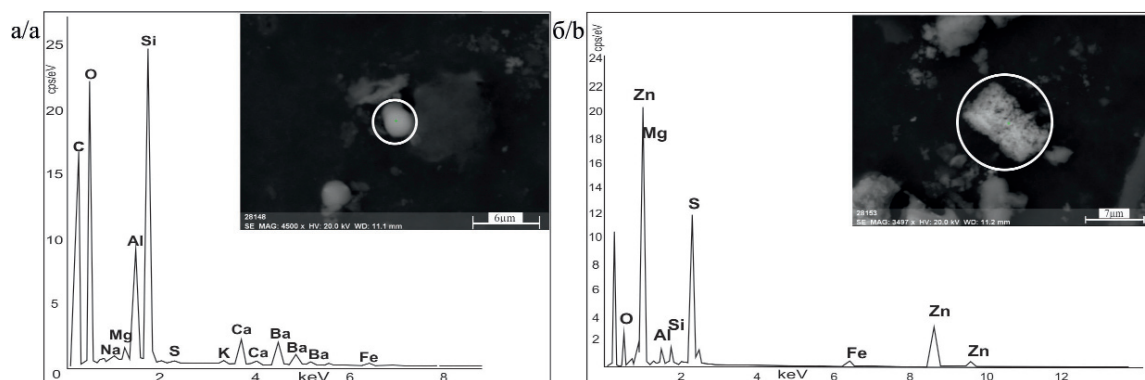


Рис. 5. Металлсодержащие фазы в твердой фазе снегового покрова в окрестностях угольной котельной: а) Al-Si-сферула с примесью Ba и Fe; б) шлаковая частица с сульфидом Zn

Fig. 5. Metal-bearing phases in solid phase of snow in the vicinity of coal-fired boiler houses: а) Al-Si-rich spherule with Ba and Fe impurities; б) slag with sulphides of Zn

Таблица 4. Характеристика металлсодержащих фаз в твердой фазе снегового покрова в окрестностях угольной котельной
Table 4. Characterization of metal-bearing phases in solid phase of snow in the vicinity of coal-fired house

Наименование фазы Phase	Преобладающие элементы Major containing elements	Элементы-примеси Element-impurities	Размер, мкм Size, μm	Форма Shape
Сульфат Ba/Ba sulphate	Ba, S, O	Ca, Fe	1,5–5,6	таблитчатая plate-shaped
Al-Si-сферула с примесью Ba и Fe Al-Si-rich spherule with Ba and Fe impurities	Al, Si, O	Na, Ca, Fe, Ba	2,5	сферическая spherical
Алюмосиликатная шлаковая частица с примесями Ba Aluminosilicate slag with Ba impurities	Al, Si, O	Ca, Na, Ba	12,3	пористая porous
Шлаковая частица с сульфидом Zn Slag with Zn sulphide	Zn, S	Fe	9,3	вытянутая, пористая elongated, porous
Сульфид Pb/Pb sulphide	Pb, S	–	3,9	кубическая cubic
Сульфид Cu/Cu sulphide	Cu, S	–	7,5	бесформенная unshaped
Интерметаллическая частица Intermetallic particle	Pb, Fe, Ti	–	0,47	бесформенная unshaped
	Fe, Cr, Ni	–	1,9	
	Fe, Cr, Ti	–	3,9	

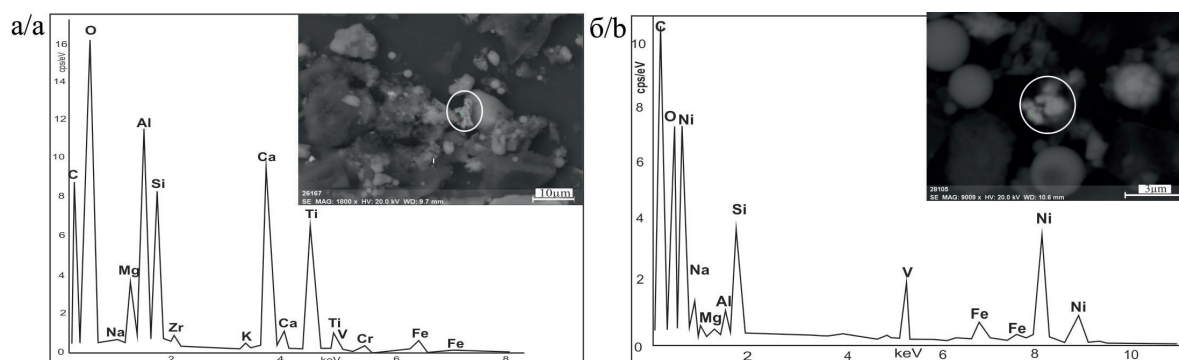


Рис. 6. Металлсодержащие фазы в твердой фазе снегового покрова в окрестностях нефтяной котельной: а) алюмо-силикатно-кальциевая частица с примесями V, Ti, Cr и Zr; б) алюмосиликатная частица с содержанием V, Ni и Fe

Fig. 6. Metal-bearing phases in solid phase of snow cover in the vicinity of oil-fired boiler houses: а) Al-Si-Ca-rich particle with V, Ti, Cr and Zr impurities; б) Al-Si-rich particle with V, Ni and Fe

держащие V и Ni, возможно использовать как индикаторы для индикации выбросов нефтяных котельных. Выявлены частицы сульфата Ba, сульфида Sb, сульфида Zn и сульфида Pb с примесью Cu, Zn, Fe.

На поверхности углеродсодержащей пористой сферулы, характерной для выбросов от сжигания нефти [26, 27], была выявлена частица оксида Cr. Этот факт, вероятно, может свидетельствовать о том, что металлсодержащие фазы могут поступать с выбросами в атмосферный воздух на поверхности сферических частиц. Кроме того, Cr был выявлен в составе силикатной частицы с примесью Fe и частицах интерметаллического состава Cr, Fe, Mn, Cu. Частицы интерметаллического состава были также представлены Cu, Zn-содержащей фазой.

Сравнительная характеристика проб твердой фазы снегового покрова из окрестностей угольной и нефтяной котельных

Анализ данных с помощью непараметрических критериев Колмогорова–Смирнова и Манна–Уитни величины пылевой нагрузки ($P_{\text{п}}$) в окрестностях угольной и нефтяной котельных показал слабо значимые различия. Средняя величина пылевой нагрузки в окрестностях угольной котельной в 2 раза выше величины в окрестностях нефтяной котельной. Эти результаты сопоставимы с литературными данными [4] о том, что котельные на жидком топливе выбрасывают меньше твердых частиц по сравнению с выбросами угольных котельных. В окрестностях изучаемой угольной котельной пылевая нагрузка формируется не

Таблица 5. Характеристика металлсодержащих фаз в твердой фазе снегового покрова в окрестностях нефтяной котельной
Table 5. Characterization of metal-bearing phases in solid phase of snow in the vicinity of oil-fired boiler house

Наименование фазы Phase	Преобладающие элементы Major containing elements	Элементы-примеси Element-impurities	Размер, мкм Size, μm	Форма Shape
Ферросферула Ferrospherules	Fe, O	V, Ni, Ti	1,4	сферическая spherical
Алюмосиликатные частицы с примесями тяжелых металлов Aluminosilicate particles with heavy metals impurities	Al, Si, O	V, Ni, Fe	1,5–1,6	бесформенная unshaped
	Al, Si, O	V, Ni, Fe, Ti	6,7	ромбическая с неровными изломами rhomb-shaped with irregular fracture
Алюмосиликатно-кальциевая частица с примесями тяжелых металлов Aluminosilicatcalcic particle with heavy metals impurities	Al, Si, Ca, O	V, Ti, Cr, Zr	8,3	бесформенная unshaped
Сульфид Sb Sb sulphide	Sb, S	Fe	1,5	вытянутая elongated
Сульфид Zn Zn sulphide	Zn, S	Fe	7,9	призматическая со ступенчатым изломом prism-shaped with step fracture
Оксид Cr Cr oxide	Cr, O	–	1,2	бесформенная unshaped
Силикатная частица с Cr Silicate particle with Cr	Si, Cr, O	Fe	3,1	угловатая angular
Сульфид Pb Pb sulphide	Pb, S	Cu, Zn, Fe	2,5	кубическая cubic-shaped
Интерметаллическая частица Intermetallic particle	Cr, Fe	Mn, Cu	2,3–8,5	угловатая с неровными изломами angular with irregular fracture
	Cu, Zn	–	7,1	бесформенная unshaped

только за счет выбросов самой котельной, но и за счет ветрового переноса от открытого склада угля, расположенного на севере в 30 м от трубы.

Оценка различий содержания элементов в пробах твердой фазы снегового покрова из окрестностей угольной и нефтяной котельных показала, что содержания Mn, Cu, Se, Ba и Hg в пробах статистически незначимо различаются. Статистически значимые, сильно и высоко значимые различия определены для остальных элементов. Пробы из окрестностей угольной котельной характеризуются статистически значимым высоким содержанием Cd, Sb, Pb, Mo и Sr, сильно значимым – Co и высоко значимым – Zn и W. Пробы из окрестностей нефтяной котельной отличаются высоко значимым содержанием Ni, сильно значимым – Cr и As и высоко значимым – V.

Оценка различий среднесуточного выпадения микроэлементов в окрестностях угольной и нефтяной котельных показала, что среднесуточные выпадения Se, Hg, Cr, Ni и Ba статистически незначимо различаются. В окрестностях угольной котельной определено статистически значимо высокое среднесуточное выпадение As, Mn и Cu, сильно значимо высокое – Cd, Pb, W, Co, Sr, Zn и Mo по сравнению со среднесуточным выпадением этих элементов в окрестностях нефтяной котельной.

Среднесуточное выпадение V статистически значительно высокое в окрестностях нефтяной котельной.

На основе выше проанализированных эколого-геохимических показателей (K_c и K_p , значимыми принимались значения более 3) (табл. 1, 2) и величины уровня значимости различия двух выборок по содержанию микроэлементов в твердой фазе снегового покрова и среднесуточного выпадения микроэлементов можно выделить вероятные элементы-индикаторы техногенной специализации твердой фазы снегового покрова в окрестностях изучаемых локальных котельных. Такие элементы, как Cd, Sb, Pb, Mo, Sr, Ba, Ni, Mo, Zn и Co можно использовать в качестве элементов-индикаторов для твердой фазы снегового покрова из окрестностей угольной котельной, тогда как V, Ni и Sb – окрестностей нефтяной котельной.

Можно предположить, что твердые частицы зольных уносов котельных фиксируются нами в снеговом покрове, и выделенные элементы-индикаторы в некоторой степени отражают геохимическую специализацию используемых углей и нефти, а также специализацию их зольных уносов. По данным работ [28–30], угли Сибири в качестве примесей содержат микроэлементы (например, Ba, Sr, Cr, Ni, Co, Cu, Pb, Zn, Cd, Hg). В обзорах [8, 31] показано, что во время сжигания угля, кот-

да происходят сложные термохимические превращения элементов-примесей, они способны накапливаться в золошлаковом материале, а многие элементы, минуя системы очистки, выбрасываются в атмосферу в составе парогазовой фазы продуктов сгорания и твердофазной мельчайшей фракции зольного уноса. Например, Co, Sb, Cd, Ba, Ni и Cr сорбируются на мелких твердых частицах (размер менее 2,5 мкм) зольных уносов и выбрасываются в воздух. Наиболее летучие элементы (Hg, Se, As) во время сжигания угля сохраняются в парогазовой фазе и, минуя системы очистки, выбрасываются в воздух. Исследования на небольших теплоэлектростанциях в Финляндии показали высокое накопление Hg, Cd, Mo, Pb и Zn в зольных уносах от сжигания угля [32].

Нефть Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции содержит V, Hg, Ni, Mn, Cr, Cu, Co, Sb и др. [33], а также относится к ванадиевому типу по величине отношения V/Ni [34]. Определено, что V и Ni могут содержаться как в крупных частицах (размер более 10 мкм) [5], так и в мелких частицах (менее 2,5 мкм) зольных уносов нефтяных ТЭЦ [35]. Исследования [5] показали, что содержание других микроэлементов в частицах зольных уносов этих ТЭЦ значительно ниже содержания в частицах в зольных уносах угольных ТЭЦ.

Кроме геохимической специализации топлива и зольных уносов котельных, концентрирование микроэлементов в твердой фазе снегового покрова может быть связано также с физико-химическими процессами в воздухе и снеговом покрове, что требует дальнейших исследований.

Элементы, образующие группу элементов техногенного дефицита (K_c и $K_p \leq 1,5$), а также элементы с K_c и K_p от 1,6 до 2,9 в изучаемых пробах, вероятно, связаны с процессами рассеивания и переноса пылегазовых составляющих в воздухе от региональных природно-техногенных источников. Вероятными природными источниками в районах исследования могут являться торфяные пожары, но данный вопрос требует дополнительного исследования. Техногенными источниками, создающими так называемое фоновое загрязнение в населенных пунктах, где расположены изучаемые объекты, могут являться дома с печным отоплением, а также в целом источники загрязнения в Асиновском и Шегарском административных районах за счет дальнего переноса. Кроме того, не исключается и трансграничный перенос пылегазовых веществ от источников промышленно-урбанизированного Томского района, с которым граничат Асиновский и Шегарский районы. Данные предположения основываются на ранее проведенных исследованиях на территории г. Томска, населенных пунктов Томского, Асиновского и Шегарского административных районов [17–21]. В работах [17–21] были показаны некоторые специфичные микроэлементы, т. е. микроэлементы с повышенным уровнем накопления в твердой фазе снегового покрова из данных районов.

Все изучаемые микроэлементы весьма опасны с экологической точки зрения, так как относятся к I–III классам опасности. По результатам СЭМ в пробах из окрестностей угольной котельной выявлены Ba-содержащие, Pb-содержащие и Fe, Cr, Ni-содержащие фазы с размером от 0,45 до 2,5 мкм. В пробах из окрестностей нефтяной котельной определены Ni, V-содержащие и Cr-содержащие фазы с размером от 1,3 до 2,3 мкм. Данные фазы можно отнести к классу мелких твердых частиц (размер менее 2,5 мкм), которые при вдыхании могут проникать в легкие, достигать альвеол, где не действуют механизмы самоочищения, и вызывать увеличение респираторных заболеваний. При хроническом поступлении может происходить накопление частиц с металлами в легочной ткани. Крупные частицы оказывают преимущественно влияние на развитие респираторных заболеваний человека [1]. Выявленные фазы могут высвобождаться или образовываться при высоких температурах в топочной камере котельных, затем поступать в воздух и оседать на снеговой покров. Такое предположение может быть поддержано, например, исследованиями металлосодержащих фаз в углях. Установлено, что элементы-примеси в углях присутствуют в виде самородных металлов, сульфидов, сплавов металлов, а также сплавов металлов с неметаллами [30], которые предположительно при высоких температурах могут переходить в зольные уносы котельных.

Оценка различий величин суммарного показателя загрязнения (Z_c) показала сильно значимые различия в окрестностях изучаемых котельных. Величина Z_c в окрестностях угольной котельной в 2 раза выше величины Z_c в окрестностях нефтяной котельной, и, как отмечалось выше, соответствует среднему уровню загрязнения с умеренно опасной экологической ситуацией. Несмотря на то, что величина суммарного потока элементов из атмосферы (Z_p) в окрестностях двух изучаемых котельных соответствует низкому уровню загрязнения с неопасной экологической ситуацией, выявлены сильно значимые различия этих величин. Величина Z_p в окрестностях угольной котельной в 12 раз выше величины в окрестностях нефтяной котельной.

Заключение

В результате проведенной оценки уровня аэротехногенного загрязнения в окрестностях угольной и нефтяной котельных по данным изучения микроэлементного состава твердой фазы снегового покрова можно сделать следующие выводы.

1. Величина пылевой нагрузки в окрестностях угольной котельной (24,4 мг/м² в сутки) выше аналогичной величины в окрестностях нефтяной котельной (10,2 мг/м² в сутки). В целом, согласно нормативным показателям, определен низкий уровень пылевого загрязнения в окрестностях изучаемых котельных. Однако относительно фоновых значений наибольшее загрязнение выявлено в окрестностях угольной котельной.

2. Анализ данных показал, что наиболее вероятными элементами-индикаторами в твердой фазе снегового покрова, представляющими особую экологическую опасность, в окрестностях угольной котельной являются Cd, Sb, Pb, Mo, Sr, Ba, Ni, Mo, Zn и Co; V, Ni и Sb – в окрестностях нефтяной котельной. Выявленные элементы-индикаторы с высокой долей вероятности отражают геохимическую специализацию используемого топлива и зольных уносов котельных, а также особенности сгорания топлива. Также не исключается вероятность влияния физико-химических процессов в атмосферном воздухе и снеговом покрове на концентрирование микроэлементов в твердой фазе снегового покрова, что требует дополнительных исследований.
3. Выявлены металлсодержащие фазы в твердой фазе снегового покрова, составляющие класс крупных (размер от 2,5 до 10 мкм) и мелких частиц (размер менее 2,5), способных проникать в респираторные органы людей. Выявленные металлсодержащие фазы могут являться индикаторными при идентификации источников загрязнения.
4. Степень обогащения твердой фазы снегового покрова, которая оценивается суммарным показателем загрязнения (Z_c), в окрестностях угольной котельной соответствует среднему

уровню загрязнения и умеренно опасной экологической ситуации ($Z_c=47,8$), а в окрестностях нефтяной котельной соответствует низкому уровню загрязнения с неопасной экологической ситуацией ($Z_c=23,1$).

5. Суммарный показатель имиссии элементов (Z_p), характеризующий не только микроэлементный состав твердой фазы снега, но и пылевую нагрузку от источников выбросов, в окрестностях угольной котельной ($Z_p=349$) и нефтяной котельной ($Z_p=28,4$) соответствует низкому уровню загрязнения с неопасной экологической ситуацией. Сравнение показывает, что величина данного показателя статистически значимо выше в окрестностях угольной котельной.
6. Большинство изучаемых микроэлементов, за исключением V и Ni, характеризуется повышенным уровнем накопления в твердой фазе снегового покрова в окрестностях угольной котельной, что, вероятно, связано не только с выбросами самой котельной, но и с ветровым переносом от открытого угольного склада.

Полученные данные возможно в дальнейшем использовать для оценки риска здоровью населения, проживающего в окрестностях изучаемых объектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (№ 16-45-700184 p_a) и гранта компании ВР (2016 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pope C.A., Dockery D.W. Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect // Journal of the Air & Waste Management Association. – 2006. – № 56 (6). – P. 709–742.
2. Ревич Б.А. К оценке влияния деятельности ТЭК на качество окружающей среды и здоровье населения // Проблемы прогнозирования. – 2010. – № 4. – С. 87–89.
3. PM 2.5 and ultrafine particulate matter emissions from natural gas-fired turbine for power generation / E. Brewer, Y. Li, B. Finken, G. Quartucy, L. Muzio, Al. Baez, M. Garibay, H.S. Jung // Atmospheric Environment. – 2016. – № 4. – P. 141–149.
4. Goodarzi F. Morphology and chemistry of fine particles emitted from a Canadian coal-fired power plant // Fuel. – 2006. – № 3. – P. 273–280.
5. Yatkin S., Bayram A. Determination of major natural and anthropogenic source profiles for particulate matter and trace elements in Izmir, Turkey // Chemosphere. – 2008. – № 4. – P. 685–696.
6. Vejehati F., Xu Z., Gupta R. Trace elements in coal: Associations with coal and minerals and their behavior during coal utilization – a review // Fuel. – 2010. – № 4. – P. 904–911.
7. Величковский Б.Т. Патогенетическое значение пиковых подъемов среднесуточных концентраций взвешенных частиц в атмосферном воздухе населенных мест // Гигиена и санитария. – 2002. – № 6. – С. 14–16.
8. Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases / F. Dominici, R.D. Peng, M.L. Bell, L. Pham, A. McDermott, S.L. Zeger, J.M. Samet // Journal American Medicine Association. – 2006. – V. 295. – № 10. – P. 1127–1134.
9. Concentrated ambient ultrafine particle exposure induces cardiac changes in young healthy volunteers / J. Samet, A. Rappold, D. Graff et al. // American journal of respiratory and critical care medicine. – 2009. – № 11. – P. 1034–1042.
10. Тайлашева Т.С., Красильникова Л.Г., Воронцова Е.С. Оценка вредных выбросов в атмосферу от котельных Томской области // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 52–55.
11. ГОСТ 17.4.1.02–83. Охрана природы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. – М.: Стандартинформ, 2008. – 12 с.
12. Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. Геохимия окружающей среды. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
13. Геохимия снежного покрова в Восточном округе Москвы / Н.С. Касимов, Н.В. Кошелева, Д.В. Власов, Е.В. Терская // Вестник Московского ун-та. Сер. 5: «География». – 2012. – № 4. – С. 14–24.
14. Янченко Н.И., Яскина О.Л. Особенности химического состава снежного покрова и атмосферных осадков в городе Братске // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – № 3. – С. 27–35.
15. Исследование нерастворимых частиц в снежном покрове Западной Сибири на профиле от Томска до эстуария Оби / В.П. Шевченко, С.Н. Воробьев, С.Н. Кирпотин, И.В. Крицков, Р.М. Манасыпов, О.С. Покровский, Н.В. Политова // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – № 6. – С. 499–504.
16. Miler M., Gosar M. Chemical and morphological characteristics of solid metal-bearing phases deposited in snow and stream sediment as indicators of their origin // Environmental science pollution research. – 2015. – № 22 (3). – P. 1906–1918.
17. Язиков Е.Г., Таловская А.В., Журняк Л.В. Оценка эколого-геохимического состояния территории г. Томска по данным изучения пылеаэрозолей и почв: монография. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 264 с.
18. Таловская А.В., Язиков Е.Г., Филимонов Е.А. Оценка загрязнения атмосферного воздуха урбанизированных районов Томской области по данным изучения снежного покрова //

- Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2014. – № 5. – С. 408–417.
19. Ртуть в пылеаэрозолях на территории г. Томска / А.В. Таловская, Е.А. Филимоненко, Н.А. Осипова, Е.Г. Язиков // Безопасность в техносфере. – 2012. – № 2. – С. 30–34.
20. Филимоненко Е.А. Эколого-геохимическая обстановка в районах расположения объектов теплоэнергетики по данным изучение нерастворимой и растворимой фаз снега (на примере Томской области): дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 152 с.
21. Geochemical Approach to Human Health Risk Assessment of Inhaled Trace Elements in the Vicinity of Industrial Enterprises in Tomsk, Russia / N.A. Osipova, E.A. Filimonenko, A.V. Talovskaya, E.G. Yazikov // Human and Ecological Risk Assessment. – 2015. – V. 21. – Iss. 6. – P. 1664–1685.
22. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. РД 52.04.186 № 2932–83. – М.: Госкомгидромет, 1991. – 693 с.
23. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве / под ред. Б.А. Ревич, Ю.Е. Саета, Р.С. Смирновой (Утв. 15 мая 1990 г. № 5174–90). – М.: ИМГРЭ, 1990. – 7 с.
24. Михальчук А.А., Язиков Е.Г. Многомерный статистический анализ эколого-геохимических измерений. Часть II. Компьютерный практикум. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 150 с.
25. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. – М.: Астрель-2000, 1999. – 762 с.
26. Characterization of atmospheric particles: analysis of particles in the Campo de Gibraltar / A. Umbria, M. Galán, M.J. Muñoz, R. Martín // Atmósfera. – 2004. – № 4. – P. 191–206.
27. Mercury study report to Congress. V. II: An inventory of anthropogenic mercury emissions in the United States. EPA-452/R-97-004. U.S.: Environmental Protection Agency, 1997. – P. 1–18–1. URL: <https://www3.epa.gov/ttn/atw/112nmerc/volume2.pdf> (дата обращения: 01.08.2016).
28. Арбузов С.И. Металлоносность углей Сибири // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – № 1. – С. 77–83.
29. Волостнов А.В., Арбузов С.И. Токсичные элементы в углях Сибири // Энергетик. – 2011. – № 3. – С. 39–44.
30. Ильенок С.С. Самородные элементы в углях и золах углей Азейского месторождения Иркутского угольного бассейна // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – № 1. – С. 65–71.
31. Ratafia-Brown J.A. Overview of trace element partitioning in flames and furnaces of utility coal-fired boilers // Fuel Processing Technology. – 1994. – № 1–3. – P. 139–157.
32. Zevenhoven R., Kilpinen P. Control of pollutants in flue gases and fuel gases. Report TKK-ENVY-4. 2nd edition. – Espoo/Turku, Finland, 2002. – 298 p.
33. Калинин Е.П. Геохимическая специализация нефти и ее природа // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. – 2009. – № 1. – С. 6–12.
34. Яценко Е.Г. Тяжелые ванадиевые нефти России // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – № 1. – С. 105–111.
35. Baumbach G. Air Quality Control. – Berlin: Springer-Verlag, 1996. – 490 p.

Поступила 03.08.2016 г.

Информация об авторах

Таловская А.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Язиков Е.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Шахова Т.С., аспирант кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Филимоненко Е.А., кандидат геолого-минералогических наук, ассистент кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 504.3[546.3+546.16]:697.32(571.16)

ASSESSMENT OF AEROTECHNOGENIC POLLUTION: CASE STUDY IN THE VICINITY OF COAL-FIRED AND OIL-FIRED LOCAL BOILER HOUSES IN TOMSK REGION

Anna V. Talovskaya¹,
talovskaj@yandex.ru

Egor G. Yazikov¹,
yazikoveg@tpu.ru

Tatyana S. Shakhova¹,
tatyana29@yandex.ru

Ekaterina A. Filimonenko¹,
filimonenkoea@mail.ru

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

Relevance of the work is caused by the necessity of environmental assessment in the vicinity of local boiler houses which use different types of fuel.

The main aim of the study is quantitative and qualitative assessment of pollution level in the vicinity of coal-fired and oil-fired local boiler houses based on solid phase composition study.

The methods used in the study: mass-spectrometry with inductive coupled plasma, atomic absorption analysis, scanning electron microscopy, empirical data processing.

Results. The higher dust load was determined in the vicinity of local coal-fired boiler house. It is exceeded in 3 times the background dust load and in 2 times of average dust load in Tomsk region. Dust load did not exceed the background value and average dust load in the region in the vicinity of local oil-fired boiler house. The results show that the higher concentrations (3–25 times exceeds the background) and deposition (3–125 times exceeds the background) of Cd, Sb, Pb, Mo, Sr, Ba, Ni, Mo, Zn and Co were identified in the vicinity of coal-fired boiler house. These elements make contribution in the middle level of pollution in the vicinity of coal-fired boiler house. The samples from the vicinity of oil-fired boiler house were characterized by high concentration (3–8 times exceeds the background) and deposition (3–8 times exceeds the background) of V, Ni and Sb. The level of pollution was estimated as low in the vicinity of oil-fired boiler house. The value of total factor of element emissions was higher in the vicinity of coal-fired boiler house. The results of SEM-EDS shown metal-bearing phases referred to PM_{2.5} and PM₁₀ in the samples of solid phase of snow. These phases could be inhaled by humans and can effect human health.

Conclusions. The comparative analysis shown that unsafe level of pollution was observed in the vicinity of coal-fired boiler house due to its emissions and windblown dust from the open coal depository. The identified element-indicators and metal-bearing phases in the solid phase of snow reflect geochemical specificity of fuel, fly ash as well as the specificity of firing, and connect with physical and chemical processes in the air and snow cover. The identified element-indicators and metal-bearing phases could be used as markers for source identification.

Key words:

Snow cover, trace elements, coal-fired boiler house, oil-fired boiler house, technogenesis, metal-bearing phases.

The research was funded by the Russian Foundation for Basic Research (16–45–700184p_a) and the grant of BP Exploration Operating Company Limited.

REFERENCES

1. Pope C.A., Dockery D.W. Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2006, no. 56 (6), pp. 709–742.
2. Revich B.A. Study the impact of fuel and energy activities on the quality of the environment and human health. *Studies on Russian Economic Development*, 2010, no. 4, pp. 87–89. In Rus.
3. Brewer E., Li Y., Finken B., Quartucy G., Muzio L., Baez Al., Garibay M., Jung H.S. PM 2.5 and ultrafine particulate matter emissions from natural gas-fired turbine for power generation. *Atmospheric Environment*, 2016, no. 4, pp. 141–149.
4. Godarzi F. Morphology and chemistry of fine particles emitted from a Canadian coal-fired power plant. *Fuel*, 2006, no. 3, pp. 273–280.
5. Yarkin S., Bayram A. Determination of major natural and anthropogenic source profiles for particulate matter and trace elements in Izmir, Turkey. *Chemosphere*, 2008, no. 4, pp. 685–696.
6. Vejehati F., Xu Z., Gupta R. Trace elements in coal: Associations with coal and minerals and their behavior during coal utilization – a review. *Fuel*, 2010, no. 4, pp. 904–911.
7. Velichkovskiy B.T. Pathogenetic significance of high daily average particulate matter concentrations in the air of urban areas. *Gigiena i sanitariya*, 2002, no. 6, pp. 14–16. In Rus.
8. Dominici F., Peng R.D., Bell M.L., Pham L., McDermott A., Zeger S.L., Samet J.M. Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases. *Journal American Medicine Association*. 2006, vol. 295, no. 10, pp. 1127–1134.
9. Samet J., Rappold A., Graff D. Concentrated ambient ultrafine particle exposure induces cardiac changes in young healthy volunteers. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 2009, no. 11, pp. 1034–1042.
10. Taylasheva T.S., Krasilnikova L.G., Vorontsova E.S. Assessment of emissions from boiler houses in Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 4, pp. 52–55. In Rus.

11. GOST 17.4.1.02–83. *Okhrana prirody. Klassifikatsiya khimicheskikh veshchestv dlya kontrolya zagryazneniya* [State Standard 17.4.1.02–83. Protection of Nature. Classification of the chemical pollution control]. Moscow, Standartinform, 2008. 12 p.
12. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Geochemistry of the environment]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p.
13. Kasimov N.S., Kosheleva N.V., Vlasov D.V., Terskaya E.V. Geochemistry of the snow cover in the eastern district of Moscow. *Vestnik Moskovskogo Universiteta, Seriya Geografiya*, 2012, no. 4, pp. 14–24. In Rus.
14. Yanchenko N.I., Yaskina O.L. Features of chemical composition of snow cover and precipitation in Bratsk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 3, pp. 27–35. In Rus.
15. Shevchenko V.P., Vorobev S.N., Kirpotin S.N., Kritskov I.V., Manasyrov R.M., Pokrovsky O.S., Politova N.V. Investigations of insoluble particles in snow cover of the Western Siberia from Tomsk to the Ob estuary. *Optika atmosfery i okeana*, 2015, no. 6, pp. 499–504. In Rus.
16. Miler M., Gosar M. Chemical and morphological characteristics of solid metal-bearing phases deposited in snow and stream sediment as indicators of their origin. *Environmental science pollution research*, 2015, no. 22 (3), pp. 1906–1918.
17. Yazikov E.G., Talovskaya A.V., Zhorniyak L.V. *Otsenka ekologo-geokhimicheskogo sostoyaniya territorii g. Tomsk po dannym izucheniya pyleaerozoley i pochv: monografiya* [Environmental assessment in Tomsk on basis of soil and dust aerosols study: monograph]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2010. 264 p.
18. Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Filimonenko E.A. Assessment of air pollution in urban areas in Tomsk region on basis of snow cover study. *Geokologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2014, no. 5, pp. 408–417. In Rus.
19. Talovskaya A.V., Filimonenko E.A., Osipova N.A., Yazikov E.G. *Rtut v pyleaerozolyakh na territorii g. Tomsk* [Mercury in Dust Aerosols in the Territory of Tomsk]. *Bezopasnost v tekhnosfere*, 2012, no. 2, pp. 30–34. In Rus.
20. Filimonenko E.A. *Ekologo-geokhimicheskaya obstanovka v rayonakh raspolozheniya obektov teploenergetiki po dannym izucheniya nerastvorimoy i rastvorimoy faz snega (na primere Tomskoy oblasti)*. Dis. Kand. nauk [Ecological and geochemical assessment in areas of power engineering facilities on basis of soluble and insoluble snow phases study (in Tomsk region) Cand. Diss.]. Tomsk, 2015. 152 p.
21. Osipova N.A., Filimonenko E.A., Talovskaya A.V., Yazikov E.G. Geochemical approach to human health risk assessment of inhaled trace elements in the vicinity of industrial enterprises in Tomsk, Russia. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2015, vol. 21, Iss. 6, pp. 1664–1685.
22. *Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery. RD 52.04.186 № 2932–83* [Manual on air pollution control. GD 52.04.186 № 2932–83]. Moscow, Goskomgidromet Publ., 1991. 693 p.
23. *Metodicheskiye rekomendatsii po otsenke stepeni zagryazneniya atmosfernogo vozdukha naseleennykh punktov metallami po ikh so-dержaniyu v snezhnom pokrove i pochve* [Guidelines on the assessment of pollution level by metals deposited in soil and snow in settlements]. Eds. B.A. Revich, Yu.E. Saet, R.S. Smirnova. Moscow, IMGRE Publ., 1990. 7 p.
24. Mikhalechuk A.A., Yazikov E.G. *Mnogomernyy statisticheskiy analiz ekologo-geokhimicheskikh izmereniy. Ch. II. Kompyuternyy praktikum* [Multidimensional statistical analysis of ecological and geochemical measurements. P. II. Computer workshop]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2014. 150 p.
25. Perelman A.I., Kasimov N.S. *Geokhimiya landshafta* [Geochemistry of landscape]. Moscow, Astreya-2000 Publ., 1999. 762 p.
26. Umbria A., Galán M., Muñoz M.J., Martín R. Characterization of atmospheric particles: analysis of particles in the Campo de Gibraltar. *Atmosfera*, 2004, no. 4, pp. 191–206.
27. *Mercury study report to Congress. Vol. II: An inventory of anthropogenic mercury emissions in the United States. EPA-452/R-97-004*. U.S.: Environmental Protection Agency, 1997. pp. 1–1–8–1. Available at: <https://www3.epa.gov/ttn/atw/112nmerc/volume2.pdf> (accessed: 01 August 2016).
28. Arbuzov S.I. Metalliferous of coal in Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 1, pp. 77–83. In Rus.
29. Volostnov A.V., Arkhipov S.I. Toxic elements in coals of Siberia. *Energetik*, 2011, no. 3, pp. 39–44. In Rus.
30. Ilenok S.S. Nuggets elements in coal and coal ash of deposits Azeysk deposit of Irkutsk coal basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 65–71. In Rus.
31. Ratafia-Brown J.A. Overview of trace element partitioning in flames and furnaces of utility coal-fired boilers. *Fuel Processing Technology*, 1994, no. 1–3, pp. 139–157.
32. Zevenhoven R., Kilpinen P. *Control of pollutants in flue gases and fuel gases. Report TKK-ENVY-4*. 2nd ed. Espoo/Turku, Finland, 2002. 298 p.
33. Kalinin E.P. Geochemical specialization of oil and its nature. *Vestnik Instituta geologii Komi NTS UrO RAN*, 2009, no. 1, pp. 6–12. In Rus.
34. Yashchenko E.G. Heavy vanadium oil in Russia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 105–111. In Rus.
35. Baumbach G. *Air Quality Control*. Berlin, Springer-Verlag, 1996. 490 p.

Received: 3 August 2016.

Information about the authors

Anna V. Talovskaya, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Egor G. Yazikov, Dr. Sc., professor, head of the department, National Research Tomsk Polytechnic University.

Tatyana S. Shakhova, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Ekaterina A. Filimonenko, Cand. Sc., assistant, 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

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати 24.10.2016. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 15,12. Уч.-изд. л. 13,68.
Заказ 415-16. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ