

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



ISSN 2413-1830

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 327, № 7, 2016

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ

г. Томск

**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)
Оствальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Шварцев С.Л., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Уленев О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Коробочкин В.В., д-р техн. наук (Россия)
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)
Тойпель У., Dsc (Германия)
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)
Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Алексеенко С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)
Руи Д., PhD (Португалия)
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (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 по каталогу агентства «Роспечать» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2016

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

ISSN 2413-1830

Импакт-фактор РИНЦ 2013 – 0,217

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

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

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

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

К публикации принимаются статьи, ранее нигде не опубликованные и не представленные к печати в других изданиях.

Статьи, отбираемые для публикации в журнале, проходят закрытое (слепое) рецензирование.

Автор статьи имеет право предложить двух рецензентов по научному направлению своего исследования.

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах www.elibrary.ru, scholar.google.com

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



ISSN 2413-1830

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

Volume 327, № 7, 2016

TPU  PUBLISHING

Tomsk

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

Editorial Board

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

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- Литолого-петрографические особенности и коллекторские свойства пород горизонта АВ, Лас-Ёганского нефтяного месторождения**
Исаева О.А., Чернышов А.И. **6**
- Изучение распределения площадей термокарстовых озёр Арктической зоны Западной Сибири и их динамики по космическим снимкам**
Брыксина Н.А., Полищук Ю.М. **13**
- Исследование и охрана радоновых источников в окрестностях г. Томска**
Семенова Н.М., Назаров А.Д., Сидорина Н.Г., Тишин П.А. **22**
- Рудная минерализация габброидов Аргысуцкого массива (северо-запад Восточного Саяна)**
Юричев А.Н. **35**
- Исследование влияния управляемых шунтирующих реакторов на режимы работы системы электроснабжения Эльгинского горнодобывающего комбината**
Андреев М.В., Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Рубан Н.Ю., Сулайманов А.О., Суворов А.А., Уфа Р.А. **46**
- Установка для бесконтактного поиска скрытых дефектов в тонких диэлектрических пленках методом коронного разряда**
Лавринович В.А., Меженский А.А., Рахимов Р.С. **58**
- Разработка систем регионального мониторинга земель на основе атласного картографирования**
Верхотуров А.А., Мелкий В.А. **66**
- Исследование сепарационных процессов углеводородных многокомпонентных систем в режимах функционирования оборудования предварительной подготовки нефти**
Николаев Е.В., Харламов С.Н. **84**
- Перспективные энергетические установки на алюминиевом топливе**
Клер А.М., Тюрин Э.А., Потанина Ю.М., Медников А.С. **100**
- Оценка тепловых энергозатрат в технологии получения твёрдого композитного топлива из низкосортного сырья**
Табакеев Р.Б., Казаков А.В. **110**
- Lithologic and petrographic features and reservoir properties of rocks of the AV, horizon in the Las-Egan oil field**
Isaeva O.A., Chernyshov A.I. **6**
- Studying the distribution of thermokarst lakes areas in arctic zone of Western Siberia and their dynamics by the ultrahigh resolution satellite images**
Bryksina N.A., Polishchuk Yu.M. **13**
- Study and protection of radon springs in the neighbor of Tomsk**
Semenova N.M., Nazarov A.D., Sidorina N.G., Tishin P.A. **22**
- Ore mineralization from gabbroides of Argysuisky massif (northwest of Eastern Sayan)**
Yurichev A.N. **35**
- Study of influence of thyristor controlled reactors on the regimes of power supply systems of Elga coal mining complex**
Andreev M.V., Borovikov Yu.S., Gusev A.S., Ruban N.Yu., Sulaymanov A.O., Suvorov A.A., Ufa R.A. **46**
- Equipment for non-contact search of hidden defects in thin dielectric films by corona discharge**
Lavrinovich V.A., Mezhenky A.A., Rakhimov R.S. **58**
- Development of land regional monitoring systems based on atlas mapping**
Verkhoturov A.A., Melkiy V.A. **66**
- Research of multicomponent hydrocarbon systems separation in modes of functioning of oil preliminary preparation equipment**
Nikolaev E.V., Kharlamov S.N. **84**
- Perspective power plants on aluminium fuel**
Kler A.M., Tyurina E.A., Potanina Yu.M., Mednikov A.S. **100**
- Assessment of thermal energy use in technique of producing solid composite fuels from low-grade raw materials**
Tabakaev R.B., Kazakov A.V. **110**

УДК 553.982.2

ЛИТОЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И КОЛЛЕКТОРСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД ГОРИЗОНТА АВ₁ ЛАС-ЁГАНСКОГО НЕФТЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Исаева Оксана Алексеевна¹,
okisaeva@yandex.ru

Чернышов Алексей Иванович²,
aich@ggf.tsu.ru

¹ Филиал ООО «Лукойл-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть» в г. Тюмени, Россия, 628485, г. Когалым, ул. Дружбы народов, 15.

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

В настоящее время большое значение приобретает проблема эффективных методов разработки нетрадиционных пород-коллекторов и пород с низкими фильтрационно-емкостными свойствами. К породам такого типа относятся песчано-алеврито-глинистые отложения горизонта АВ₁ Лас-Ёганского нефтяного месторождения с текстурой типа «рябчик», которые широко развиты на месторождениях Нижневартовского свода.

Цель работы: детальные и систематические исследования литолого-петрографических особенностей отложений горизонта АВ₁ исследуемого нефтяного месторождения и типизация пород-коллекторов горизонта по одному или нескольким параметрам.

Методы исследования. В качестве материала для исследований использовались образцы керн, отобранные из отложений горизонта АВ₁ Лас-Ёганского месторождения из скважин 3001, 187р, 9609, 9617. Проанализировано более 50 образцов керн с использованием седиментологических и литологических методик исследования терригенных осадочных образований; проведено макроописание керн с определением текстурных особенностей. Лабораторные работы включали оптико-микроскопические, гранулометрические, рентгенографические, электронно-микроскопические методы исследования представительных образцов пород, что позволило выявить их отличительные признаки по физическим и петрофизическим параметрам.

Результаты. Горизонт АВ₁ на месторождениях Субширотной Оби отличается сложным строением. Верхнюю часть разреза слагают породы со значительным содержанием глинистой компоненты. Ниже по разрезу глинистые «рябчики» замещаются опесчаненными «рябчиками», далее наблюдаются прослои слоистых алевролитов и алевропесчаников с флазерными текстурами. Прслеживается огрубление терригенного материала сверху вниз, при этом плотность пород уменьшается, а коэффициент пористости и проницаемости возрастает. В верхней части горизонта залегает региональный репер, представленный глинистыми отложениями кошайской пачки. Нижним репером служат комковатые пестроцветные глины вартовской свиты. В горизонте АВ₁ выделяются продуктивные пласты: АВ₁¹⁺² и АВ₁³, которые отличаются друг от друга литологическим составом, условиями осадконакопления и дебитом скважин.

Ключевые слова:

Нетрадиционные коллекторы, глинистые коллекторы, оптико-микроскопический метод, рентгеноструктурный метод, рябчиковые текстуры, фациальные условия образования.

Район исследований находится в центральной части Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, Среднеобской нефтегазоносной области. В тектоническом плане Лас-Ёганское месторождение приурочено к Нижневартовскому своду, осложненному структурами II, III и IV порядков (рис. 1). Объектом исследования являются терригенно-осадочные отложения горизонта АВ₁, относящиеся к нижней подсвите алымской свиты [1, 2].

Особенностью разрезов горизонта АВ₁ является широкое развитие в продуктивных отложениях «рябчиковых» текстур, имеющих сложный литологический состав, обусловленный быстро меняющимися фациальными условиями бассейна седиментации. В алеврито-песчаных отложениях преобладают пологоволнистые и линзовидные текстуры, обусловленные тонким переслаиванием двух либо трех литотипов: песчаников, алевролитов и глин, которые образуют «рябчиковую» текстуру. Толщина глинисто-гидрослоистых слоев в них варьирует от 1 мм до 2–3 см, иногда более (рис. 2) [3–5].

По мнению В.П. Алексеева, породы с «рябчиковыми» текстурами сформированы в активно-мелководной обстановке седиментации, относятся к фации глинистых и алеврито-песчаных осадков приберегового взмучивания (БПВ). Группа – бассейновая, подгруппа – мелководно-бассейновая, макрофация – отложения полуизолированного малоподвижного бассейнового мелководья, фация – глинисто-алевритовых осадков приливно-отливной зоны (ватты) [3, 4].

В основу выделения типов пород с «рябчиковыми» текстурами положена классификация Ф. Петтиджона (1981 г.), основанная на структурно-текстурных особенностях отложений [6–12]. В процессе исследований по разрезам изученных скважин выделены все четыре типа (условно литотипа) «рябчиков», средние значения фильтрационно-емкостных параметров которых значительно варьируют в пределах литотипов:

- сильно глинистый «рябчик»
($K_{mp}=0,01-0,06 \cdot 10^{-3}$ мкм²);



Рис. 1. Фрагмент тектонической карты Центральной части Западно-Сибирской плиты (под ред. В.И. Шпильмана, Н.И. Змановского, Л.Л. Подсосовой, 1998 г.)

Fig. 1. Tile of tectonic map of the central part of the West Siberian plate (eds. V.I. Spilman, N.I. Zmanovsky, L.L. Podsova, 1998)

- глинистый «рябчик» ($K_{\text{по}}=5,2-16,5\%$, $K_{\text{пр}}=0,09-0,14 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^2$);
 - слоистый «рябчик» ($K_{\text{по}}=18,2-19,5\%$, $K_{\text{пр}}=0,79-2,1 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^2$);
 - опесчаненный (собственный) «рябчик» ($K_{\text{по}}=17,2-21,65\%$, $K_{\text{пр}}=72,9-123,7 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^2$),
- где $K_{\text{пр}}$ – коэффициент абсолютной проницаемости, 10^{-3} мкм^2 ; $K_{\text{по}}$ – коэффициент пористости, %.

Следует отметить, что выделенные типы «рябчиков» в целом представляют собой неравномерное или сравнительно неравномерное сочетание двух, а иногда трех литотипов. То есть это смешанные породы, сформированные в определенных гидродинамических условиях, которые характеризуются различными структурно-текстурными признаками и определенными фильтрационно-емкостными свойствами [13, 14]. Нами была предпринята попытка с помощью гранулометрического анализа отделить песчано-алевритовую фракцию от глинистой составляющей в валовой пробе всех выделенных типов «рябчиков» и получить количественное содержание последней в каждой из них.

Сильно глинистый «рябчик» представлен глинистыми алевритами с высоким содержанием (от 35 % и выше) глинистого материала. Для них характерна неразвитая слоистость, когда глинистые прослои сливаются, изолируя песчано-алевритовые элементы разреза.

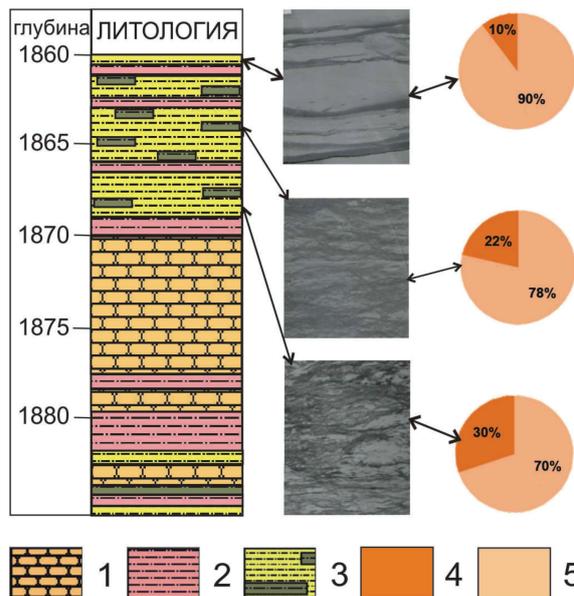


Рис. 2. Распределение пород с «рябчиковыми» текстурами Лас-Еганского месторождения в скв. 3331т. 1 – песчаники, 2 – алевриты крупно-мелкозернистые, 3 – алевриты мелко-крупнозернистые, глинистые, 4 – содержание песчаного и алевритового материала, 5 – содержание глинистого материала

Fig. 2. Distribution of the «ryabchik»-type rocks in the well no. 3331t, Las-Egan oil field. 1 are the sandstones, 2 are the coarse- and fine-grained siltstones, 3 are the clayey and fine- and coarse-grained siltstones, 4 is the sand and silt particle content, 5 is the clay particle content

Глинистый «рябчик» представлен породами с повышенным содержанием глинистого материала (20–35 %). Для них характерна линзовидная слоистость.

Слоистый «рябчик» представлен породами, содержание глинистого материала в которых составляет (10–20 %). Текстуры характеризуются волнистой слоистостью.

Опесчаненный, собственно «рябчик» содержит глинистого материала менее 10 %, характеризуется флазерной текстурой.

Выделение количества глинистой составляющей в породах горизонта АВ₁ выполнено по данным гранулометрического анализа (табл. 1). В приведенной таблице мы видим, что с увеличением содержания глины ухудшаются коллекторские свойства пород. В образцах ядра рентгеноструктурным анализом установлен минералогический состав пород, при этом для каждого литотипа рассчитано среднее значение каолинита, хлорита, гидрослюда и смешаннослойных образований (табл. 2).

Как отмечалось выше, породы типа «рябчик» представлены сочетанием двух и более литотипов (алевритов, глин и т. д.), поэтому в шлифах охарактеризованы отдельно песчано-алевритовая и глинистая составляющие пород.

Таблица 1. Выделение количества глинистой составляющей в разных типах «рябчика» по данным гранулометрического анализа

Table 1. Clay fraction percentage in different «ryabchik»-type rocks (derived from the PDS analysis)

Литотип Lithotype	Слоистость Bedding	Содержание глинистого материала, % Clay fraction, %	Пористость, K _{пор} , % Porosity, %	Проницаемость, K _{пр} , 10 ⁻³ мкм ² Permeability, 10 ⁻³ μm ²
Сильно глинистый «рябчик» Very clayey «ryabchik»	Неразвитая слоистость Undeveloped bedding	≥35	9,5	-
Глинистый «рябчик» Clayey «ryabchik»	Линзовидно-волнистая слоистость Combination of lenticular and wavy bedding	20–35	5,2–16,5	0,06
Слоистый «рябчик» Laminated «ryabchik»	Волнистая слоистость Wavy bedding	15–20	13–17	0,25–1,68
Опесчаненный «рябчик» Slightly sandy «ryabchik»	Флазерная слоистость Flaser bedding	<10	16–22	2,5–40

Примечание. K_{пр} – коэффициент абсолютной проницаемости, 10⁻³ мкм², K_{пор} – коэффициент пористости в %.

Note. K_{пр} is the absolute permeability coefficient, 10⁻³ μm²; K_{пор} is the porosity coefficient, %.

Таблица 2. Средние содержания глинистых минералов в породах пласта АВ₃ Лас-Еганского месторождения

Table 2. Average percentage of clay minerals in the AV₃ rocks (Las-Egan oil field)

Литотип Lithotype	Содержание, %/Content, %			
	Каолинит Kaolinite	Хлорит Chlorite	Гидрослюда Hydromica	Смешанно-слоистые образования Mixed-layer material
Сильно глинистый «рябчик» Very clayey «ryabchik»	52,5	27,8	18,0	3,3
Глинистый «рябчик» Clayey «ryabchik»	60,1	25,5	12,6	2,3
Слоистый «рябчик» Laminated «ryabchik»	64,0	31,0	4,0	2,0
Опесчаненный «рябчик» Slightly sandy «ryabchik»	69,0	27,0	4,0	-

Песчано-алевритовый материал образует линзочки и тонкие, часто прерывистые прослои. В составе обломочной части преобладают кварц (40–49 %) и полевые шпаты (30–38 %) при незначительном количестве пород (5–18 %) и слюды (5–10 %). Отмечен мелкий растительный детрит. Цемент в породах поровый, глинисто-гидрослюдистый, реже карбонатного состава, его распределение крайне неравномерное.

Таблица 3. Фильтрационно-ёмкостные свойства и плотность исследованных пород с «рябчиковыми» текстурами Лас-Еганского и Нивагальского месторождений

Table 3. Reservoir properties of the «ryabchik»-type rocks in the Las-Egan and Nivagal oil fields

Литотип Lithotype	K _{пр} , ×10 ⁻³ мкм ² Permeability, ×10 ⁻³ μm ²	K _{пор} , % (по насыщ.) Porosity, % (from saturation)	Плотность, г/см ³ Density (g/cm ³)	
			Объёмная Bulk	Минеральная кажущаяся Apparent matrix
Опесчаненные «рябчики» с флазерными текстурами, н/н песчаники (ср-м/з, м/з) Slightly sandy «ryabchik»-type rocks with flaser bedding (medium-fine grained and fine-grained sandstones)	105,97 [18] 0,13–407,71	21,1 [18] 16,8–24,1	2,12 [19] 2,02–2,38	2,67 [18] 2,65–2,71
Глинистые «рябчики» с линзовидно-волнистой текстурой, опесчаненные в различной степени, в т. ч. н/н Clayey «ryabchik»-type rocks with combined lenticular and wavy bedding and varying degrees of sandiness (including oil-saturated rocks)	0,26 [26] 0,05–0,94	16,7 [10] 14,3–19,9	2,24 [10] 2,15–2,31	2,69 [10] 2,69–2,70
Алевриты м-кр/з, косослоистые (слоистость пологоволистая и косая) Low-angle cross-bedded, fine- to coarse-grained siltstones	0,26 [12] 0,17–0,55	14,6 [2] 5,2–20,9	2,31 [3] 2,14–2,57	2,71 [3] 2,70–2,71

Примечание: н/н – нефтенасыщенные, ср-м/з – средне-мелкозернистые, м/з – мелкозернистые, м-кр – мелко-крупнозернистые. В числителе средние значения из (n-количества проб), в знаменателе min и max значения.

Note: н/н – oil-saturated, ср-м/з – medium-fine grained, м/з – fine grained, м-кр – fine-to-coarse grained. Mean values among n-number of samples are in the numerator, min and max values are in the denominator.

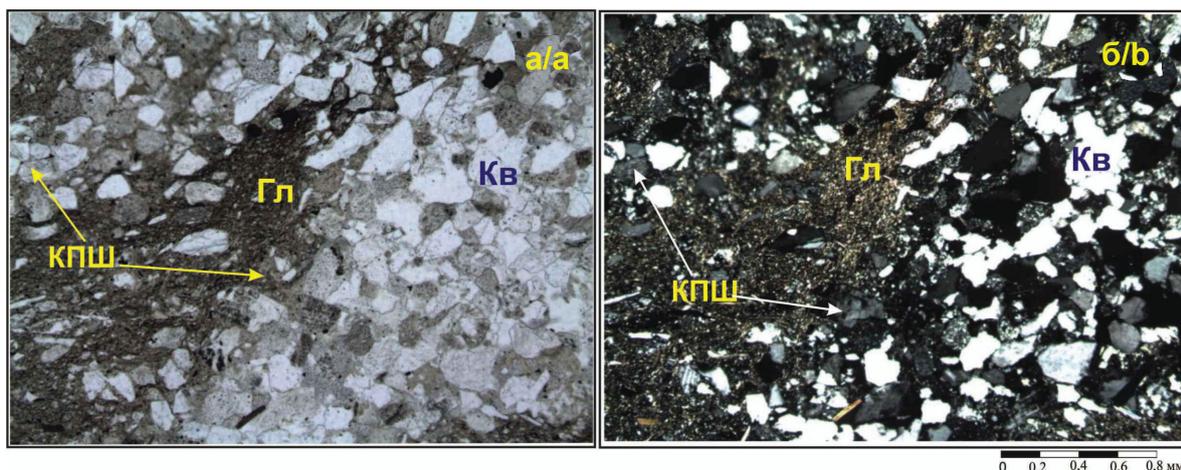


Рис. 3. Линза глинисто-гидрослюдистого состава в мелкозернистом песчанике пласта АВ₁³. Кв – кварц, Гл – глинисто-гидрослюдистый материал, КПШ – калиевые полевые шпаты. Обр. 323–9716–208. Николи: а) ||, б) X

Fig. 3. Hydromica clay lens in the АВ₁³ fine-grained sandstones. Кв is the quartz, Гл is the hydromica clay material, КПШ is the potassium feldspar. Sample No. 323–9716–208. a) parallel nicols, b) crossed nicols

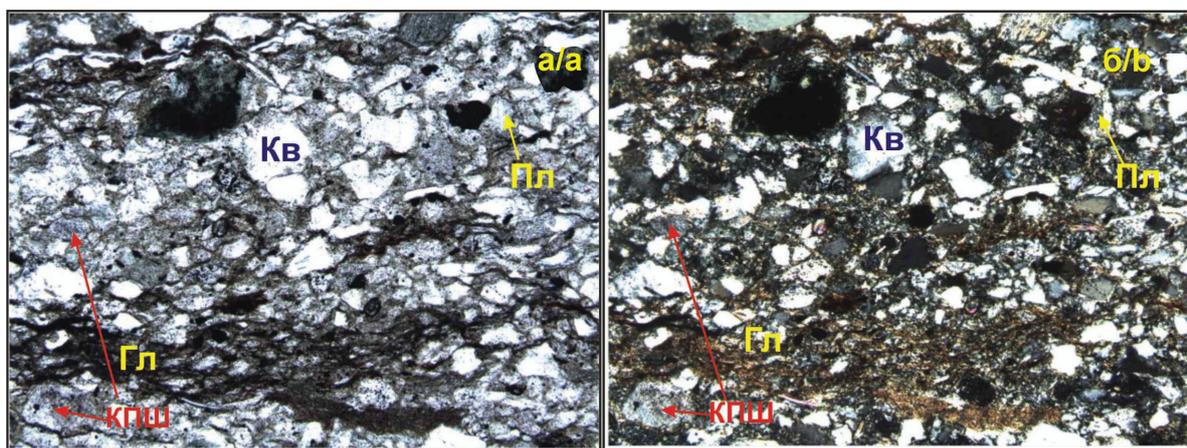


Рис. 4. Неравномерное чередование алевролитов мелкозернистых и алевролитов крупнозернистых песчаных с глинисто-гидрослюдистыми прослоями в пласте АВ₁³. Кв – кварц, Гл – глинисто-гидрослюдистый материал, КПШ – калиевые полевые шпаты, Пл – плагиоклаз. Обр. 323–187–211. Николи: а) ||, б) X

Fig. 4. Irregularly alternated fine-grained, coarse-grained sandy siltstones and hydromica clay material in the АВ₁³ pay zone. Кв is the quartz, Гл is the hydromica clay material, КПШ is the potassium feldspar. Sample No. 323–187–211. a) parallel nicols, b) crossed nicols

Глинистая составляющая «рябчиков» представлена глинисто-гидрослюдистыми намывами и прослоями, обуславливающими текстурные особенности пород. Толщина слоев достигает 6,0 мм (рис. 3, 4) [15–20].

Для каждого выделенного литотипа пород горизонта АВ₁ Лас-Ёганского и Нивагальского месторождений в табл. 3 приведены значения фильтрационно-ёмкостных свойств и их плотность. По данным рентгеноструктурного анализа, соотношение глинистых минералов в цементе – каолинита, хлорита и гидрослюды – зависит от типа «рябчика» и варьирует в значительных пределах, среди них преобладающим является каолинит (65–68 %).

Заключение

Таким образом, результаты исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Структурно-текстурные особенности исследованных пород по разрезам скважин свидетельствуют о формировании отложений пласта АВ₁³ Лас-Ёганского месторождения в условиях трансгрессии. При этом исследуемые разрезы пласта АВ₁³ характеризуются.
2. С уменьшением глинистой составляющей плотность пород уменьшается, а коэффициент пористости и проницаемости возрастает.
3. В верхней части разреза залегают породы со значительным содержанием глинистой компонен-

ты. Ниже по разрезу исследованных скважин глинистые «рябчики» замещаются опесчаненными «рябчиками», далее – наблюдаются прослойки слоистых алевролитов и алевропесчаников с флазерными текстурами. Таким образом, в разрезе изученных скважинах выделены все четыре типа пород с «рябчиковыми» текстурами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Литолого-минералогическая характеристика и особенности порового пространства отложений пласта АВ₁³ (группы «рябчик») Урьевского месторождения / О.А. Исаева, Л.Н. Бружес, В.А. Вавилин, О.К. Мартынова, А.Ю. Медведев // Материалы VII Всероссийского литологического совещания «Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории». – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. – С. 388–392.
2. Исаева О.А., Вавилин В.А. Литолого-минералогическая характеристика и особенности порового пространства отложений пласта АВ₁³ (группы «рябчик») Урьевского месторождения // Материалы XVI научно-практической конференции «Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала Ханты-Мансийского автономного округа». – Югра: Изд-во Департамента по недропользованию Ханты-Мансийского автономного округа, 2013. – С. 229–235.
3. Алексеев В.П. Атлас субаквальных фаций нижнемеловых отложений Западной Сибири (ХМАО – Югра). – Екатеринбург, Изд-во УГГУ, 2014. – 284 с.
4. Алексеев В.П. Литолого-фациальный анализ. – Екатеринбург: УГГА, 2003. – 147 с.
5. Лидер М.Р. Седиментология. Процессы и продукты. – М.: Мир, 1986. – 439 с.
6. Маслов А.В. Осадочные породы: методы изучения и интерпретация полученных данных. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2005. – 288 с.
7. Мильнер Г.Б. Петрография осадочных пород. Т. 2. – М.: Недра, 1968. – 665 с.
8. Петтиджон Ф.Дж. Осадочные породы. – М.: Недра, 1981. – 752 с.
9. Rodgers J. The nomenclature and classification of sedimentary rocks // Amer. Jour. Sci. – 1950. – V. 248. – P. 297–311.
10. Bailey E.B. New light on sedimentation and tectonics // Geol. Mag. – 1930. – V. 67. – P. 77–92.
11. Bailey E.B. Sedimentation in relation to tectonics // Bull. Geol. Soc. Amer. – 1936. – V. 47. – P. 1713–1726.
12. Bouma A.H. Methods for the study of sedimentary structures. – New York: Wiley, 1969. – 458 p.
13. Рухин Л.Б., Сердюченко Д.П., Татарский В.Б. Справочное руководство по петрографии осадочных пород. – Л.: Гостоптехиздат, 1958. – 488 с.
14. Теодорович Г.И. Учение об осадочных породах. – Л.: Гостоптехиздат, 1958. – 578 с.
15. Фортунатова Н.К., Агафонова Г.В. Песчаники: состав, структура, классификация, макроописание и изучение в шлифах. – М.: ВНИГНИ, 2012. – 134 с.
16. Рединг Х.Г. Обстановки осадконакопления и фации. Т. 1. – М.: Мир, 1990. – 352 с.
17. Рейнек Г.-Э., Сингх И.Б. Обстановки терригенного осадконакопления. – М.: Недра, 1981. – 439 с.
18. Селли Р.Ч. Древние обстановки осадконакопления. – М.: Недра, 1989. – 294 с.
19. Klein G. V. Paleotidal sedimentation (abstr.) // Geol. Soc. Amer. with Prog. – 1970. – V. 2. – № 7. – P. 598–608.
20. Reineck H.-E., Wunderlich F. Classification and origin of flaser and lenticular bedding // Sedimentology. – 1968. – V. 11. – P. 99–105.

Поступила 15.03.2016 г.

Информация об авторах

Исаева О.А., геолог 2-й категории филиала ООО «Лукойл-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть» в г. Тюмени.
Чернышов А.И., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры петрографии Национального исследовательского Томского государственного университета

UDC 553.982.2

LITHOLOGIC AND PETROGRAPHIC FEATURES AND RESERVOIR PROPERTIES OF ROCKS OF THE AV₁ HORIZON IN THE LAS-EGAN OIL FIELD

Oksana A. Isaeva¹,
okisaeva@yandex.ru

Alexey I. Chernyshov²,
aich@ggf.tsu.ru

¹ «Lukoil-Engineering» «KogalymNIPoll»,
15, Druzhby narodov street, Kogalym, 628485, Russia.

² National Research Tomsk State University,
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Nowadays the problem of the efficient methods for exploring unconventional reservoirs and poor reservoir rocks are of great importance. Such rocks include the «ryabchik»-type AV₁ horizon of Las-Egansky oilfield, represented by interbedded fine layers of sandstone, siltstone and claystone. This horizon is widely distributed in the Nizhnevartovsk Arch.

The aim of the research is the detailed and systematic study of lithological and petrographic features of sediment horizon AV₁ of the investigated oilfield and their typification on the basis of two or more parameters.

The methods used. The core samples from sediments of AV₁ horizon of Las-Yogansky oilfield (wells 3001, 187r, 9609, 9617) were used for the study. The authors have analyzed more than 50 core samples using sedimentological and lithological research techniques of clastic sedimentary formations and carried out macro description of the core defining the textural features. The laboratory work included optical microscopy, particle size distributions, X-ray, electron-microscopic methods of study of the given rock samples, which allowed identifying their distinctive features by physical and petrophysical parameters.

Results. The AV₁ horizon in the oil fields of Sublatitudinal Near-Ob region is characterized by a complex structure. The upper part of the horizon is composed of rocks with a high content of clay component. Lower the section the clay «ryabchiks» are replaced by sandstone-bearing «ryabchiks», then the interlayers of laminar siltstones and siltstone-sandstones with flaser textures are observed. One can observe the top-down coarsening of terrigenous material, while the density of the rock is reduced, and the coefficients of porosity and permeability increase. Regional marker represented by the clayey deposits of the Koshai member occurs in the upper part of the AV₁ horizon. The low marker is lumpy variegated clayey sediments of the Vartovsk formation. Two pay zones (AV₁¹⁺² и AV₁³) are known in the AV₁ horizon. They differ in lithology, depositional environment and oil flow rate.

Key words:

Unconventional reservoir rocks, clayey reservoir rocks, optic microscopy, X-ray diffraction analysis, «ryabchik»-type textures, facies conditions of formation.

REFERENCES

- Isaeva O.A., Bruzhes L.N., Vavilin V.A., Martynova O.K., Medvedev A.Yu. Litologo-mineralogicheskaya kharakteristika i osobennosti porovogo prostranstva otlozheniy plasta AV₁₃ (gruppy «ryabchik») Ur'evskogo mestorozhdeniya [Lithological and mineralogical characteristics and features of pore space of sediments of AV₁₃ layer (group «ryabchik») of Urevesky oilfield]. *Materialy VII Vserossiyskogo litologicheskogo soveshchaniya «Osadochnye basseyny, sedimentatsionnye i postsedimentatsionnye protsessy v geologicheskoy istorii»* [Proceedings of VII All-Russian lithological meeting. Sedimentary basins, sedimentation and Postsedimentary processes in geological history]. Novosibirsk, INGG SO RAN, 2013. pp. 388–392.
- Isaeva O.A., Vavilin V.A. Litologo-mineralogicheskaya kharakteristika i osobennosti porovogo prostranstva otlozheniy plasta AV₁₃ (gruppy «ryabchik») Urevskogo mestorozhdeniya [Lithological and mineralogical characteristics and features of pore space of sediments of AV₁₃ layer (group «ryabchik») of Urevesky oilfield]. *Materialy XVI nauchno-prakticheskoy konferentsii «Puti realizatsii neftegazovogo i rudnogo potentsiala KKhanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga»* [Materials of XVI scientific-practical conference. Ways of implementation of oil-gas and ore potential of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug]. Yugra, Subsurface management department of Khanty-Mansiysk autonomus region Publ., 2013. pp. 229–235.
- Alekseev V.P. *Atlas subakvalnykh fatsiy nizhnemolovykh otlozheniy Zapadnoy Sibiri (KhMAO-Yugra)* [Atlas of the Lower Cretaceous subaqueous facies in West Siberia]. Ekaterinburg, UGGU Press, 2014. 284 p.
- Alekseev V.P. *Litologo-fatsialny analiz* [Lithofacies analysis]. Ekaterinburg, UGGGA Publ., 2003. 147 p.
- Lider M.R. *Sedimentologiya. Protsessy i produkty* [Sedimentology. Processes and products]. Moscow, Mir Publ., 1986. 439 p.
- Maslov A.V. *Osadochnye porody: metody izucheniya i interpretatsiya poluchennykh dannykh* [Sedimentary rocks: methods to study and results interpretation]. Ekaterinburg, UGGU Press, 2005. 288 p.
- Milner G.B. *Petrografiya osadochnykh porod* [Sedimentary petrology]. Moscow, Nedra Publ., 1934. 338 p.
- Pettijohn F.J. *Osadochnye porody* [Sedimentary rocks]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 752 p.
- Rodgers J. The nomenclature and classification of sedimentary rocks. *Amer. Jour. Sci.*, 1950, vol. 248, pp. 297–311.
- Bailey E.B. New light on sedimentation and tectonics. *Geol. Mag.*, 1930, vol. 67, pp. 77–92.
- Bailey E.B. Sedimentation in relation to tectonics. *Bull. Geol. Soc/Amer.*, 1936, vol. 47, pp. 1713–1726.
- Bouma A.H. *Methods for the study of sedimentary structures*. New York, Wiley, 1969. 458 p.
- Rukhin L.B., Serdyuchenko D.P., Tatarskiy V.B. *Spravochnoe rukovodstvo po petrografii osadochnykh porod* [Guidelines for sedi-

- mentary petrology]. Leningrad, Gostoptekhizdat Publ., 1958. 488 p.
14. Teodorovich G.I. *Uchenie ob osadochnykh porodakh* [Theory of sedimentary rocks]. Leningrad, Gostoptekhizdat Publ., 1958. 578 p.
 15. Fortunatova N.K., Agafonova G.V. *Peschaniki: sostav, struktura, klassifikatsiya, makroopisanie i izuchenie v shlifakh* [Sandstones: composition, textural features, description and thin-section examination]. Moscow, VNIGNI Press, 2012. 134 p.
 16. Reading H.G. *Obstanovki osadkonakopleniya* [Depositional environments and facies]. Moscow, Mir Publ., 1990. Vol. 1, 352 p.
 17. Reineck H.-E., Singh I.B. *Obstanovki terrigennogo osadkonakopleniya* [Clastic depositional environments]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 439 p.
 18. Sally R.Ch. *Drevnie obstanovki osadkonakopleniya* [Ancient depositional environments]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 294 p.
 19. Klein G.V. Paleotidal sedimentation (abstr.). *Geol. Soc. Amer. with Prog.*, 1970, vol. 2, no. 7, pp. 598–608.
 20. Reineck H.-E., Wunderlich F. Classification and origin of flaser and lenticular bedding. *Sedimentology*, 1968, vol. 11, pp. 99–105.

Received: 15 March 2016.

Information about the authors

Oksana A. Isaeva, geologist, «Lukoil-Engineering» «KogalymNIPIoll».

Alexey I. Chernyshov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk State University.

УДК 551.345:528.88

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОЩАДЕЙ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ И ИХ ДИНАМИКИ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

Брыксина Наталья Анатольевна¹,
bryksina83@gmail.com

Полищук Юрий Михайлович^{2,3},
yupolishchuk@gmail.com

¹ Институт прикладной информатики и математической геодезии Балтийского Федерального университета им. И. Канта, Россия, 236041, г. Калининград, ул. А. Невского, 14.

² Центр дистанционного зондирования Земли Югорского научно-исследовательского института информационных технологий, Россия, 628011, г. Ханты-Мансийск, ул. Мира, 151.

³ Научно-исследовательский информационный центр Института химии нефти СО РАН, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 4.

Актуальность работы обусловлена недостаточно изученными закономерностями распределения размеров и динамики термокарстовых озер, рассматриваемых в качестве активных источников эмиссии метана в атмосферу в арктических районах в условиях глобального потепления последних десятилетий.

Цель работы: дистанционное исследование динамики термокарстовых озер и распределения их площадей в Арктической зоне Западной Сибири на основе космических снимков среднего и сверхвысокого разрешения.

Методы исследования: методы ключевых (тестовых) участков; дистанционные методы исследования полей термокарстовых озер с использованием спутниковых снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения; метод разновременных спутниковых снимков для изучения динамики озер; методы геоинформационных систем для пространственного анализа данных о термокарстовых озерах, полученных из спутниковых изображений.

Результаты. Анализ экспериментальных данных о размерах термокарстовых озер с площадью от нескольких десятков до сотен кв. м, полученных по снимкам сверхвысокого разрешения, показал, что гистограммы распределения малых озер по площадям в Арктической зоне Западной Сибири допускают их аппроксимацию как степенными, так и экспоненциальными функциями. На основе дистанционных исследований динамики термокарстовых озер по разновременным снимкам среднего разрешения, полученных за период 1973–2013 гг. в Арктической зоне Западной Сибири, установлены отличия динамики в разных ландшафтных зонах. В зоне арктической тундры Западной Сибири в среднем проявляется тенденция роста суммарной площади озер, в субарктической тундре – тенденция ее сокращения, а в зоне лесотундры особенностей изменения площадей озер во времени не выявлено.

Ключевые слова:

Многолетняя мерзлота, Сибирская Арктика, геоинформационные системы, площади озер, разновременные спутниковые снимки, изменение климата, тестовые участки, ландшафтный анализ.

Введение

Современное глобальное потепление климата, наиболее явно проявляющееся в северных широтах планеты, ускоряет деградацию многолетней мерзлоты. Мерзлота, являясь хранилищем законсервированного углерода в обширных мерзлых торфяных болотах Сибири и Северной Америки, при потеплении климата может стать источником возникновения еще большего потепления при высвобождении парниковых газов [1]. Потепление в арктических регионах в последние сто лет происходило почти вдвое интенсивнее, чем в среднем по земному шару. В частности, рост температуры приземного арктического воздуха за период 1950–2010 гг. составил 0,4 °С в летние и 1,65 °С в зимние месяцы [2]. Наиболее чувствительными к температурным изменениям на территории многолетней мерзлоты оказываются озерно-термокарстовые ландшафты [3, 4].

Таяние мерзлоты в условиях современного потепления климата вызывает снижение прочности многолетнемерзлых грунтов, что сопровождается, согласно [5–9], увеличением численности и изменением размеров термокарстовых озер в зоне мерзлоты. Образование термокарстовых озер в связи с деградацией многолетней мерзлоты в условиях глобального потепления последних десятилетий наблюдается на Аляске, в Канаде, Скандинавии и в Западной и Восточной Сибири [10–14], значительную долю которых занимают малые термокарстовые озера. Так, согласно [5], число вновь образующихся малых озер за период последних четырех десятилетий в зоне мерзлоты Западной Сибири более чем в 20 раз превышает число озер, исчезнувших за это же время. Согласно [14, 15], наиболее активным источником эмиссии метана в зонах многолетней мерзлоты являются малые термокарстовые озера с площадью менее 0,01–0,02 га, что

связано с активной термокарстовой эрозией берегов, увеличивающей эмиссию метана [16]. Из-за своих малых размеров такие озера, как правило, не учитываются в прогнозных оценках вклада метана в общий парниковый эффект.

Важными для прогноза эмиссии метана из термокарстовых озер в зоне мерзлоты являются знания о динамике площадей озер и законах распределения малых озер по их площадям. Исследования распределения малых озер по размерам проводились на территории Восточной Сибири [10]. В [6] изложены результаты исследований распределения озер на территории Западной Сибири, находящейся южнее Арктической зоны. Поэтому представляет интерес изучение особенностей распределения площадей малых озер в Арктической зоне Западной Сибири. Динамика площадей термокарстовых озер на различных территориях в зонах мерзлоты изучалась в ряде работ, например [4, 9, 13]. Однако, насколько нам известно, особенности многолетней динамики озер Арктической зоны исследованы недостаточно. В связи с этим целью работы явилось дистанционное исследование закономерностей распределения по площадям термокарстовых озер и их динамики в арктических районах Западной Сибири в условиях потепления климата последних десятилетий с использованием спутниковых снимков.

1. Исследование распределения площадей малых термокарстовых озер

Исследования проводились в Арктической зоне Западной Сибири, представляющей собой территорию, расположенную к северу от Северного полярного круга. Для проведения исследований сформирована коллекция космических снимков Quick Bird сверхвысокого разрешения (0,6 м), включающая 9 снимков. Выбор тестовых участков (ТУ) для проведения исследований производился в границах сцен космических снимков в местах активного термокарста, определяемого по наибольшему сгущению озер.

На рис. 1 представлена карта-схема расположения ландшафтных зон исследуемой территории Западной Сибири, составленная на основе [17], на которой видно, что выбранные тестовые участки довольно равномерно распределены по территории исследований. Общая характеристика выбранных тестовых участков дана в табл. 1, из которой видно, что для исключения влияния изменений водности на территории термокарстово-озерных ландшафтов космические снимки выбирались в течение достаточно короткого теплого периода, не превышающего трех месяцев (с 1 июня по 28 августа).

Обработка космических изображений и определение площадей озер по спутниковым снимкам выполнены с использованием программных средств

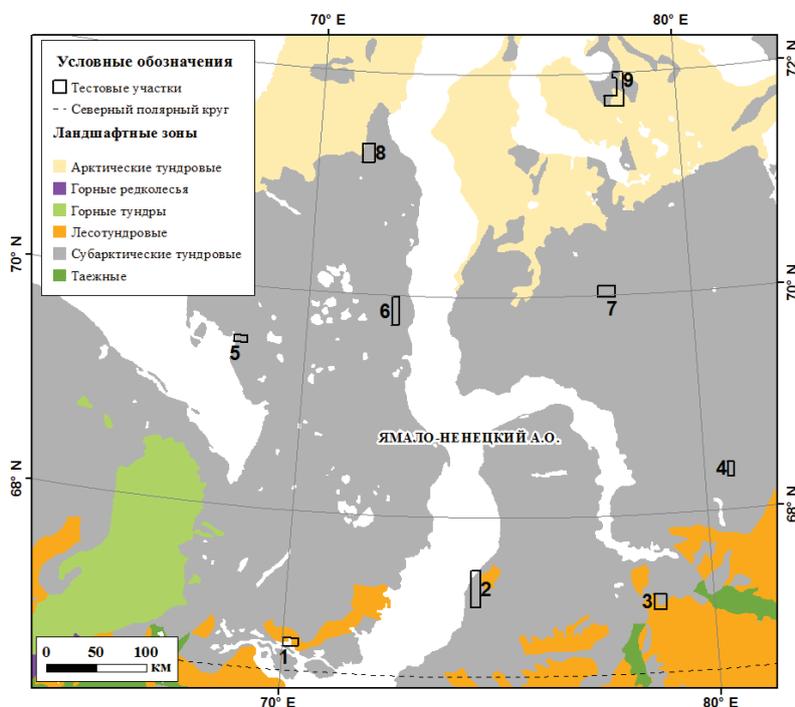


Рис. 1. Карта-схема ландшафтного зонирования территории Арктической зоны Западной Сибири с обозначенными границами тестовых участков для исследования распределения площадей малых озер

Fig. 1. Schematic map of landscape zoning for the territory of Western Siberia Arctic zone with the marked boundaries of the test sites for studying small lakes distribution

ENVI 4.7 и ArcGIS 9.3. Классификация водных объектов на снимках проводилась способом двоичного кодирования (алгоритм Binary encoding classification) в программном обеспечении ENVI 4.7. На каждом тестовом участке средствами ArcGIS 9.3 были определены от нескольких сотен до нескольких тысяч термокарстовых озер.

Таблица 1. Данные о времени съемки и местоположении тестовых участков

Table 1. Data on shooting time and location of the test sites (TS)

№ ТУ TS number	Дата съемки Shooting date	Долгота Longitude	Широта Latitude	Площадь участка, км ² TS area, km ²
1	Quick Bird (04.07.2008)	70,1	66,5	131,0
2	Quick Bird (02.08.2004)	74,3	67,2	340,6
3	Quick Bird (28.08.2005)	78,4	67,1	198,6
4	Quick Bird (01.05.2009)	80,4	68,2	88,0
5	Quick Bird (05.07.2008)	68,2	69,3	98,6
6	Quick Bird (15.08.2003)	72,2	69,5	205,2
7	Quick Bird (28.07.2004)	77,5	70,2	197,0
8	Quick Bird (28.08.2005)	71,2	71,2	237,0
9	Quick Bird (04.07.2008)	78,2	71,5	381,8

В табл. 2 представлены данные об основных статистических параметрах выборочных совокупностей малых термокарстовых озер.

Таблица 2. Характеристика выборочных совокупностей малых озер на разных тестовых участках

Table 2. Sample characteristics of small lakes on different test sites

№ ТУ TS number	Объем выборки Sample size	Среднее значение площади озер, м ² Average area of lake, m ²
1	6725	41,97
2	283	44,92
3	7810	12,37
4	8094	19,88
5	456	66,66
6	509	53,36
7	3315	24,20
8	3035	11,70
9	3910	10,38

Для всех исследованных ТУ были построены гистограммы распределения числа малых термокарстовых озер по их площадям на основе результатов дистанционного измерения площадей озер по снимкам сверхвысокого разрешения. На рис. 2 приведен пример экспоненциальной аппроксимации гистограммы распределения озер по площадям, полученной по экспериментальным данным на ТУ-1. Здесь K_i – относительное число озёр, попа-

дающих в каждый i -й интервал гистограммы, определяемое по формуле

$$K_i = \frac{n_i}{N},$$

где n_i – число озёр в каждом интервале гистограммы; i – номер интервала; N – суммарное количество озёр на исследуемом тестовом участке. Для удобства интервалы гистограммы обозначены в единицах площадей озер.

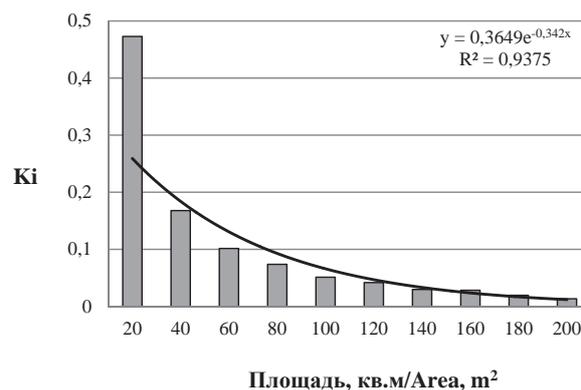


Рис. 2. Пример экспоненциальной аппроксимации гистограммы распределения малых озер по площадям на ТУ-1

Fig. 2. Example of exponential approximation of small lakes empirical distribution in areas on the TS-1

Согласно рис. 2, график гистограммы распределения озер, полученной по снимкам сверхвысокого разрешения, демонстрирует характерную закономерность – уменьшение относительного числа озер по мере увеличения их площадей (рис. 2). Эта закономерность проявляется и при анализе гистограмм распределения площадей термокарстовых озер больших размеров, полученных в [18] по результатам дистанционного измерения площадей озер по космическим снимкам Landsat среднего разрешения (30 м). Как видно на рис. 2, эмпирическое распределение озер по площадям с достаточно высоким значением коэффициента детерминации может быть аппроксимировано экспоненциальной функцией с коэффициентами $\alpha=0,3649$ и $\beta=-0,342$. Аналогично рис. 2 гистограммы на остальных тестовых участках тоже допускают экспоненциальную аппроксимацию (с высоким уровнем коэффициента детерминации R^2 – более 0,90).

Можно показать, что гистограммы распределения малых озер по площадям на всех тестовых участках допускают также аппроксимацию и степенной функцией в виде

$$y = a \cdot x^b,$$

где a и b – коэффициенты степенной аппроксимации.

В табл. 3 приведены значения коэффициентов экспоненциальной и степенной аппроксимаций гистограмм распределения малых озер по их площадям на всех исследованных тестовых участках. Представленные в этой таблице достаточно высо-

кие значения коэффициентов детерминации подтверждают достоверность аппроксимации гистограмм как экспоненциальной (среднее значение $R^2=0,84$), так и степенной (среднее значение $R^2=0,94$) функциями. Сравнение приведенных здесь средних значений коэффициентов детерминации показывает, что аппроксимация гистограмм степенным законом распределения дает более высокую достоверность. Заметим, что степенным законом описываются эмпирические распределения озер по площадям и в исследованиях на планетарном уровне [19].

Таблица 3. Коэффициенты аппроксимации гистограмм распределения озер по площадям

Table 3. Approximation coefficients of empirical distribution of lakes' areas

Номер ТУ TS number	Экспоненциальная аппроксимация Exponential approximation			Степенная аппроксимация Power approximation		
	α	β	R^2	a	b	R^2
1	0,36	0,34	0,94	0,50	-1,45	0,98
2	0,34	0,32	0,91	0,46	-1,36	0,98
3	0,21	0,50	0,75	0,45	-2,3	0,95
4	0,27	0,43	0,79	0,50	-1,99	0,97
5	0,28	0,22	0,95	0,30	-0,88	0,87
6	0,37	0,31	0,99	0,45	-1,27	0,95
7	0,34	0,44	0,86	0,58	-1,97	0,99
8	0,18	0,47	0,71	0,40	-2,21	0,93
9	0,15	0,40	0,63	0,29	-1,93	0,85
Средние значения Average values	0,28	0,38	0,84	0,44	-1,71	0,94

2. Исследование динамики площадей термокарстовых озер

При исследовании многолетней динамики озер необходимо использовать коллекцию разновременных спутниковых снимков за период не менее 30–50 лет, чтобы выявить изменения климатического масштаба. К сожалению, время съемки имеющихся в настоящее время снимков высокого и сверхвысокого разрешения в лучшем случае не превышает 10–15 лет. Единственно пригодными для изучения многолетней динамики термокарста являются снимки с космических аппаратов Landsat, архивы которых накапливаются уже более 40 лет. Как показывает опыт отечественных и зарубежных дистанционных исследований, эти снимки широко используются для изучения динамики термокарстовых озер в зонах мерзлоты разных регионов. Однако в Арктической зоне закономерности динамики озер изучены недостаточно.

Исследования динамики термокарстовых озер в Арктической зоне Западной Сибири проводились на 14 тестовых участках, выбранных в местах активного термокарста и исходя из условия наличия пар разновременных безоблачных снимков Landsat на каждый тестовый участок. Как видно из табл. 4, в которой дана общая характеристика вы-

бранных ТУ, площади участков приблизительно одинаковы, а их сравнительно небольшие размеры позволяют обеспечить относительную однородность геокриологических и ландшафтных свойств территорий тестовых участков.

Таблица 4. Характеристика тестовых участков

Table 4. Characteristic of test sites

Район исследования Study area	Количество тестовых участков Number of test sites	Интервал изменений площади ТУ, тыс. км ² Interval of TS area changes, thousands km ²	Средняя площадь тестовых участков, тыс. км ² Average area of test sites, thousands km ²
Западная Сибирь Western Siberia	14	2,2–4,1	3,506

На рис. 3, представляющем карта-схему расположения ландшафтных зон на территории Западной Сибири, показано местоположение выбранных ТУ. Видно, что тестовые участки достаточно равномерно размещены на исследуемой территории. Распределение их по ландшафтным зонам Западной Сибири дано в табл. 4.

Исследование изменений площадей термокарстовых озер на выбранных тестовых участках выполнено дистанционным методом с использованием разновременных космических снимков. Для проведения дистанционных исследований на каждый тестовый участок были подобраны разновременные пары безоблачных снимков Landsat, полученные в летние месяцы в период с 1973 по 2013 г. Все снимки отобраны из общедоступного архива Global Land Cover Facility, имеют географическую привязку в проекции UTM и относятся к уровню обработки 1T, включающему радиометрическую и геометрическую коррекцию с использованием цифровых моделей рельефа. Общее количество снимков Landsat на территории исследования в Западной Сибири составило 28. Обработка космических снимков и определение площадей озер выполнены с использованием программных средств ENVI 4.7 и ArcGIS 9.3.

На основе полученных результатов дистанционного измерения площадей озер был проведен количественный анализ временных изменений суммарных площадей термокарстовых озер за время исследований. Для каждого тестового участка рассчитывались суммарные площади озер в разные годы наблюдений и были определены абсолютные и относительные величины их изменения в достаточно длительных временных интервалах в пределах 1973–2013 гг. Величина относительного изменения суммарной площади определялась в соответствии с формулой:

$$R = (S_k - S_n) / S_n,$$

где S_k и S_n – суммарная площадь озер на тестовом участке в конечный и начальный годы исследования соответственно.

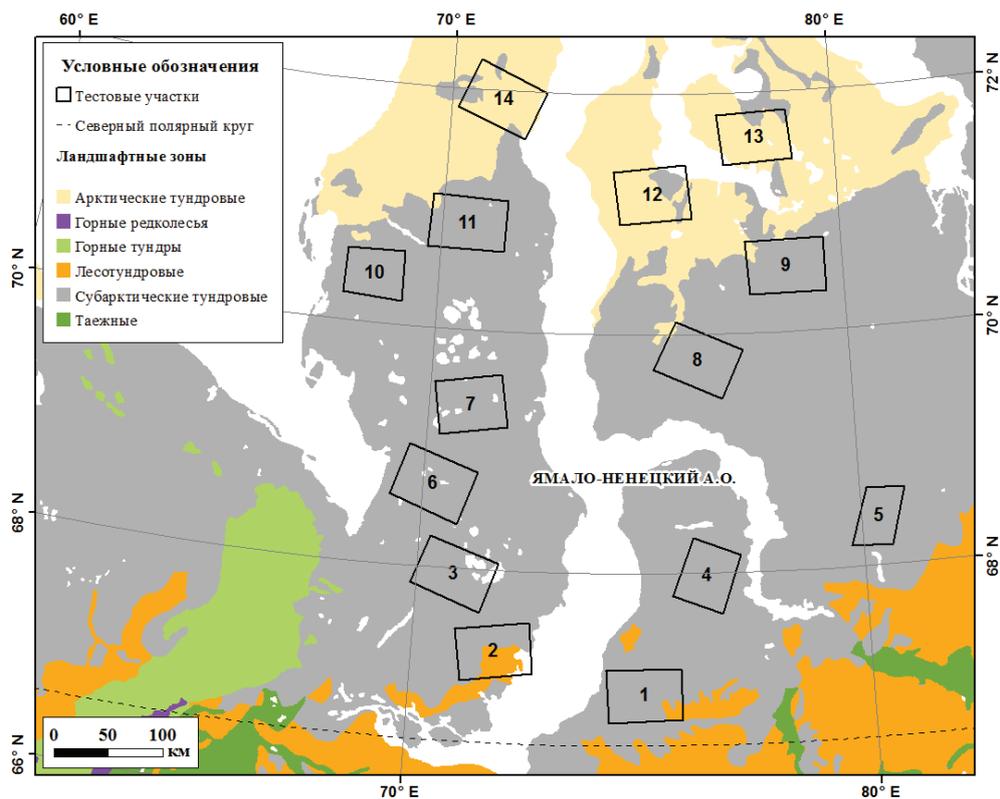


Рис. 3. Карта-схема ландшафтного зонирования исследуемой территории с обозначенными границами тестовых участков для изучения многолетней динамики полей термокарстовых озер

Fig. 3. Schematic map of landscape zoning for the research territory with the marked boundaries of the test sites for studying long-term dynamics of thermokarst lakes fields

Положительные значения R показывают увеличение суммарной площади озер, а отрицательные значения этой величины – сокращение площади озер. Нулевое значение R , означающее отсутствие изменений площадей озер за период наблюдений, показывает уравнивание двух тенденций изменения площадей, а именно: роста или сокращения площадей в среднем во времени.

Рассчитанные величины показателя R представляются далее в виде графических зависимостей величины относительного изменения суммарных площадей озер от географической широты, анализ которых позволяет выявлять основные тенденции во временных изменениях площадей озер в зависимости от ландшафтного зонирования территории и изменения географической широты.

График относительного изменения суммарных площадей озер (показатель R) в Арктической зоне Западной Сибири в зависимости от географической широты представлен на рис. 4, на котором точками показаны средние значения показателя R на каждом ТУ, а крестиком – их усредненное значение по всем тестовым участкам на этой территории, равное 2,4 %. Следовательно, на исследуемой территории Арктической зоны Западной Сибири в среднем преобладает тенденция сокращения пло-

щадей термокарстовых озер. Аналогичная тенденция сокращения суммарной площади озер за период 1973–1998 гг. была выявлена, по данным [21], и в прерывистой зоне многолетней мерзлоты.

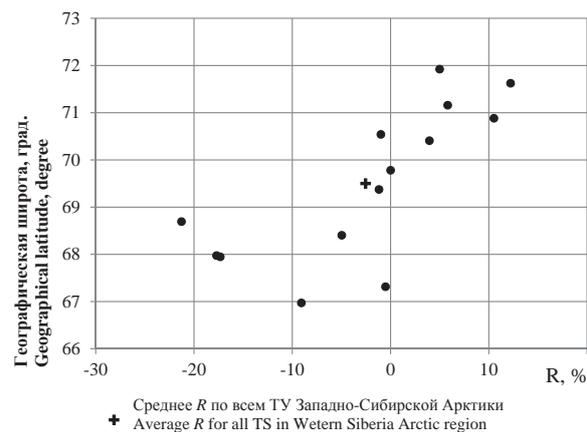


Рис. 4. Относительные величины изменения суммарной площади озер в зависимости от географической широты в Арктической зоне Западной Сибири

Fig. 4. Relative values of change in the total area of lakes depending on the latitude in the Arctic zone of Western Siberia

Однако можно отметить и особенности многолетней динамики озер в зависимости от широты. Как видно на рис. 4, на широтах более 70° с. ш. в среднем наблюдается рост суммарной площади озер, а на широтах менее 70° с. ш. – сокращение их площади. Следовательно, можно считать, что в Арктической зоне Западной Сибири диапазон широт вблизи значений 70° с. ш. является областью перехода от тенденции сокращения площадей термокарстовых озер к тенденции их роста в среднем при увеличении географической широты.

Рассмотрим изменение величины R в зависимости от ландшафтного зонирования исследуемой территории. На рис. 5 представлен график относительного изменения суммарной площади озер по ландшафтным зонам. Длина серой полоски равна среднему значению показателя R , рассчитанному для соответствующей ландшафтной зоны.

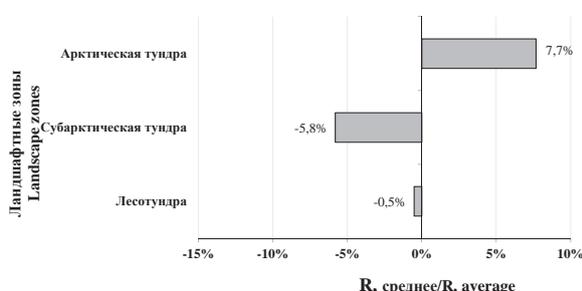


Рис. 5. Среднее значение относительного изменения суммарной площади озер в разных ландшафтных зонах территории Арктики Западной Сибири

Fig. 5. Average value of relative change in the total area of lakes in different landscape zones of Western Siberia Arctic region

Как видно на рис. 5, тенденция роста площадей озер в арктической тундре Западной Сибири изменяется на тенденцию сокращения площадей при переходе в зону субарктической тундры. Отметим, что в зоне лесотундры не проявляется какой-либо выраженной тенденции в изменении суммарной площади озер, так как величина показателя R на графике близка к нулю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. North Siberian lakes: a methane source fuelled by Pleistocene Carbon / S.A. Zimov, Y.V. Voropaev, I.P. Semiletov, S.P. Davidov, S.F. Prosiannikov, F.S. Chapin, M.C. Chapin, S. Trumbore, S. Tyler // Science. – 1997. – V. 277. – № 5327. – P. 800–802.
2. МГЭИК, 2007. Отчет межправительственной группы экспертов по изменениям климата. URL: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_ru.pdf (дата обращения: 10.05.2016).
3. Викторова А.С., Капралова В.Н., Трапезникова О.Н. Математическая модель морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин в изменяющихся климатических условиях // Криосфера Земли. – 2015. – № 2. – С. 26–34.
4. 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.
5. Брыксина Н.А., Полищук Ю.М. Анализ изменения численности термокарстовых озер в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Криосфера Земли. – 2015. – Т. 19. – № 2. – С. 114–120.
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 Y., Kirpotin S., Bryksina N. Remote study of thermokarst lakes dynamics in West-Siberian permafrost. Ch. 5 // In: Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems / Ed. by O. Pokrovsky. – NY: Nova Science Publishers, 2014. – P. 173–204.
8. Днепровская В.П., Брыксина Н.А., Полищук Ю.М. Изучение изменений термокарста в зоне прерывистого распространения вечной мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Исследование Земли из космоса. – 2009. – № 4. – С. 88–96.

Заключение

В статье представлены результаты дистанционного исследования статистического распределения площадей малых термокарстовых озер (с площадью до 200 м^2). Такие озера вызывают в последнее время значительный интерес у исследователей термокарстовых процессов в зоне мерзлоты на арктических территориях в связи с тем, что они рассматриваются в качестве важных источников эмиссии метана в атмосферу на территории озерно-термокарстовых равнин в Арктике в условиях потепления климата последних десятилетий. Эти исследования выполнены на 9 тестовых участках в Арктической зоне Западной Сибири с использованием спутниковых снимков сверхвысокого пространственного разрешения ($0,6 \text{ м}^2$). Анализ полученных экспериментальных данных о размерах и численности термокарстовых озер показал, что гистограммы распределения озер по площадям допускают их аппроксимацию как степенными, так и экспоненциальными функциями, однако степенная аппроксимация дает более высокую достоверность.

Изучены закономерности многолетней динамики полей термокарстовых озер в Арктической зоне Западной Сибири на основе космических снимков среднего разрешения. Исследования проведены на 14 тестовых участках, расположенных в разных ландшафтных зонах арктической территории многолетней мерзлоты. Использованы разновременные космические снимки Landsat, полученные за период 1973–2013 гг. Проведенный анализ показал существенные различия в динамике термокарстовых озер в разных ландшафтных зонах. Так, в зоне арктической тундры в среднем проявляется тенденция роста суммарной площади озер, в субарктической тундре – сокращения площадей озер, а в зоне лесотундры каких-либо выраженных тенденций изменения площадей озер со временем не выявлено.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ по проектам № 16–35–50143 и 15–45–00075.

9. Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences. Ch. 4. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections / A.I. Shiklomanov, R.B. Lammers, D.P. Lettermaier, Y.M. Polishchuk, O.G. Savichev, L.C. Smith / Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. – Dordrecht; Heidelberg; New-York; London: Springer, 2013. – P. 111–154.
10. 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.
11. Riordan B., Verbyla D., McGuire A.D. Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950–2002 remotely sensed images // J. Geophys. Res. – 2006. – V. 111. – P. 1–11. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005JG000150/pdf> (дата обращения 03.04.2016).
12. Luoto M., Seppala M. Thermokarst ponds as indicator of the former distribution of palsas in Finnish Lapland // Permafrost and Periglacial Processes. – 2003. – V. 14. – P. 19–27.
13. Zuidhoff F.S., Kolstrup E. Changes in palsa distribution in relation to climate change in Laivadalén, Northern Sweden, especially 1960–1997 // Permafrost and Periglacial Processes. – 2000. – V. 11. – P. 55–69.
14. 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.
15. Методические вопросы оценки запасов метана в малых термокарстовых озерах криолитозоны Западной Сибири / Ю.М. Полищук, В.Ю. Полищук, Н.А. Брыксина, О.С. Покровский, С.Н. Кирпотин, Л.С. Широкова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг Георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 2. – С. 127–136.
16. 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.
17. Ландшафтная карта СССР / под ред. И.С. Гудилина. – М.: Моск. госуд. университет, 1987. URL: http://www.landscape.edu.ru/science_maps.shtml (дата обращения: 03.04.2016).
18. Полищук Ю.М., Полищук В.Ю. Имитационное моделирование полей термокарстовых озер на территории многолетней мерзлоты // Информационные системы и технологии. – 2011. – № 1. – С. 53–60.
19. 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. – № 18. – P. 1–7.
20. 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.
21. Disappearing Arctic Lakes / L.C. Smith, Y. Sheng, G.M. MacDonald, L.D. Hinzman // Science. – 2005. – V. 308. – № 3. – P. 1429.

Поступила 14.06.2016 г.

Информация об авторах

Брыксина Н.А., кандидат географических наук, старший научный сотрудник Института прикладной информатики и математической геодезии Балтийского федерального университета им. И. Канта.

Полищук Ю.М., доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Центра дистанционного зондирования Земли Югорского научно-исследовательского института информационных технологий; главный научный сотрудник научно-исследовательского информационного центра Института химии нефти СО РАН.

UDC 551.345:528.88

STUDYING THE DISTRIBUTION OF THERMOKARST LAKES AREAS IN ARCTIC ZONE OF WESTERN SIBERIA AND THEIR DYNAMICS BY THE ULTRAHIGH RESOLUTION SATELLITE IMAGES

Natalia A. Bryksina¹,
bryksina83@gmail.com

Yury M. Polishchuk²,
yupolishchuk@gmail.com

¹ Kant Baltic Federal University,
14, A. Nevskogo street, Kaliningrad, 236041, Russia.

² Institute of Petroleum Chemistry,
4, Akademicheskoye avenue, Tomsk, 634021, Russia.

The relevance of the paper is caused by insufficiently studied regularities of distribution of sizes and dynamics of thermokarst lakes, considered as the most active sources of methane emissions to the atmosphere in the Arctic regions under global warming.

The main aim of the study is the remote research of dynamics of thermokarst lakes and distribution of their areas in the Arctic zone of Western Siberia, based on middle and ultra-high resolution satellite images.

Methods: methods of key (test) sites; remote method of research of thermokarst lakes fields, including small lakes, using satellite images of high and very high spatial resolution; method of multi-temporal satellite images for studying the lakes' dynamics; techniques of geographic information systems for the spatial analysis of data on thermokarst lakes obtained from satellite images.

The results. The analysis of experimental data on the size of thermokarst lakes, which area is from a few tens to hundreds of square meters, obtained by the ultra-high resolution images, showed that the histograms of size-distribution of small lakes in Arctic zone of Western Siberia allow their approximation both by power and exponential functions. Based on remote sensing studies of the dynamics of thermokarst lakes on multi-temporal images of medium resolution obtained for 1973–2013 in the Arctic zone of Western Siberia, the differences of the dynamics were determined in different landscape zones. In the area of the Arctic tundra of Western Siberia there is in average a tendency of growing total area of lakes, in the subarctic tundra there is the tendency to reduce it, and in the forest tundra the features of temporal changes of lake areas were not identified.

Key words:

Permafrost, Siberian Arctic, geoinformation systems, areas of lakes, multi-temporal satellite images, climate changes, test sites, landscape analysis.

The research was supported by the grants of RFBR by the projects no. 16–35–50143 and 15–45–00075.

REFERENCES

- Zimov S.A., Voropaev Y.V., Semiletov I.P., Davidov S.P., Prosiannikov S.F., Chapin F.S., Chapin M.C., Trumbore S., Tyler S. North Siberian lakes: a methane source fuelled by Pleistocene Carbon. *Science*, 1997, vol. 277, no. 5327, pp. 800–802.
- IPCC, 2007. Otchet Mexhpravitelstvennoy gruppy ekspertov po izmeneniyam klimata [Report of the Intergovernmental group of experts on climate changes]. Available at: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_ru.pdf (accessed 10 May 2016).
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Polishchuk Y., Kirpotin S., Bryksina N. Remote study of thermokarst lakes dynamics in West-Siberian permafrost. Ch. 5. In: *Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems*. Ed. by O. Pokrovsky. NY, Nova Science Publishers, 2014. pp. 173–204.
- Dneprovskaya V.P., Bryksina N.A., Polishchuk Yu.M. Study of thermokarst changes in discontinuous permafrost zone of Western Siberia based on space images. *Study of Earth from Space*, 2009, no. 4, pp. 88–96. In Rus.
- Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Lettermaier D.P., Polishchuk Y.M., Savichev O.G., Smith L.C. *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*. Ch. 4. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections. Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. Dordrecht; Heidelberg; New-York; London, Springer, 2013. pp. 111–154.
- 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.
- Riordan B., Verbyla D., McGuire A.D. Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950–2002 remotely sensed images. *J. Geophys. Res.*, 2006, vol. 111. pp. 1–11. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005JG000150/pdf> (accessed 3 April 2016).
- Luoto M., Seppala M. Thermokarst ponds as indicator of the former distribution of palsas in Finnish Lapland. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2003, vol. 14, pp. 19–27.

13. Zuidhoff F.S., Kolstrup E. Changes in palsa distribution in relation to climate change in Laivadalen, Northern Sweden, especially 1960–1997. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2000, vol. 11, pp. 55–69.
14. 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, no. 8, pp. 565–583.
15. Polishchuk Yu.M., Polishchuk V.Yu., Bryksina N.A., Pokrovsky 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. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 2, pp. 127–135. In Rus.
16. 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.
17. Landshaftnaya karta SSSR [Landscape map of the USSR]. Ed. by I.S. Gudilin. Moscow, Moscow State University Press, 1987. Available at: http://www.landscape.edu.ru/science_maps.shtml/ (accessed 3 April 2016).
18. Polishchuk Yu.M., Polishchuk V.Yu. Imitation modeling of thermokarst lakes fields in permafrost. *Information systems and technologies*, 2011, no. 1, pp. 53–60. In Rus.
19. 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.
20. 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.
21. Smith L.C., Sheng Y., MacDonald G.M., Hinzman L.D. Disappearing Arctic Lakes. *Science*, 2005, vol. 308, no. 3, pp. 1429.

Received: 14 June 2016.

Information about the authors

Natalia A. Bryksina, Cand. Sc., senior researcher, Kant Baltic Federal University.

Yury M. Polishchuk, Dr. Sc., principal researcher, Institute of Petroleum Chemistry.

УДК 502.51(571.16)

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОХРАНА РАДОНОВЫХ ИСТОЧНИКОВ В ОКРЕСТНОСТЯХ Г. ТОМСКА

Семенова Наталья Михайловна¹,
nmsemnv@mail.tomsknet.ru

Назаров Александр Дмитриевич²,
nazarov@tpu.ru

Сидорина Наталья Геннадьевна³,
resurs@niikf.tomsk.ru

Тишин Платон Алексеевич¹,
tishin_pa@mail.ru

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

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

³ Томский НИИ курортологии и физиотерапии,
Россия, 634050, г. Томск, ул. Р. Люксембург, 7.

Несмотря на длительную историю исследований, состав и качество воды радоновых источников г. Томска и его ближайших окрестностей до конца не изучены. Наиболее высокие уровни присутствия радона отмечаются в подземных водах юго-восточной части Томска в бассейне р. Ушайки в окрестностях пос. Заварзино. Бальнеологические свойства воды выходящих здесь родников практически не изучались. Радоновые источники на территории Томска издавна использовались для водоснабжения. В местах их расположения в пригородной зоне они по-прежнему используются и оберегаются населением как источники чистой питьевой воды. В связи с интенсивным освоением пригородных территорий радоновые источники вместе с их природным окружением имеют ключевое значение для формирования экологического каркаса и выделения зон особой охраны. Они являются неотъемлемой частью природного наследия Томского региона и подлежат охране в зависимости от условий расположения, состава и качества воды.

Цель работы: анализ традиций и приоритетов исследования и использования радоновых источников в Томском регионе; комплексная геоэкологическая оценка наиболее перспективных для установления особой охраны радоновых источников в ближнем пригороде г. Томска.

Методы исследования: работа с литературными и нормативными правовыми источниками, определяющими современный статус радоновых источников как объектов традиционного природопользования и охраны природы; картирование размещения родников в полевых условиях; опробование родников; физико-химические и радиологические исследования родниковых вод.

Результаты. Представлены результаты сравнительного анализа воды популярных среди населения источников г. Томска. Детально изучен родник Чистый ключ ($222Rn=39,5$ Бк/дм³) на правом берегу р. Ушайки у пос. Заварзино. По результатам анализа воды и состояния прилегающей территории родник определен как ценный в эколого-хозяйственном отношении объект, для защиты которого необходимо создание особо охраняемой природной территории областного значения.

Ключевые слова:

Родники, памятники природы, радоновые воды, природные минеральные воды, Томская область.

Введение

В основе современных исследований радонсодержащих родниковых вод лежат две очевидные и принципиально противоположные мотивировки. С одной стороны, учитывая опасность радона для здоровья человека, речь идет о санитарно-гигиеническом и радиологическом контроле питьевых вод. Подобные исследования проводятся в разных регионах и странах независимо от уровня экономического развития и социальной обстановки [1–7]. Контроль содержания радона-222 в природных источниках представляет важную составную часть экологических исследований в Российской Федерации, в том числе в границах крупных городских поселений [8–11]. Положительным результатом

систематических или выборочных испытаний проб родниковой воды являются минимальные уровни вмешательства для радона, удовлетворяющие требованиям нормативной документации в области экологической и радиационной безопасности [1–11].

С другой стороны, радоновые воды являются общепризнанным лечебным ресурсом. В этом случае исследовательский интерес представляет достаточно высокое содержание радона в природных источниках [12–14], что позволяет их использовать в бальнеологических целях, как, например, на Алтае [15–16], в Хакасии [17] или других географических регионах [18], располагающих данным видом природных лечебных ресурсов. Эманации радона

являются также эффективным инструментом экологического мониторинга и прогноза и используются в разных сферах геоэкологических исследований, выступая, например, в качестве предвестника тектонической активности [19], фактора, определяющего условия жизнедеятельности населения в геотермальных зонах [20], индикатора природных источников радиоактивности [21–22].

Отдельные исследовательские мотивировки опираются на традиционные представления о ценности радоновых источников, веками складывающиеся в народе и передающиеся из поколения в поколение. Речь идет о целебных источниках, культурных местах [23–27], объектах традиционного водопользования в зонах постоянного или сезонного пребывания человека, качество воды в которых не всегда соответствует санитарным нормам [8, 28–29]. Соответственно, возникает проблема обеспечения надлежащего санитарного состояния целебных и питьевых источников, их рационального использования, а в ряде случаев – организации специальной охраны [25, 30–33].

Материалы и методы исследований

Исходными материалами для выполнения настоящей работы послужили опубликованные и фондовые источники, а также оригинальные данные, полученные в результате полевых исследований и лабораторных испытаний проб воды. Основные полевые исследования проводились в 2014 г. в рамках выполнения программы комплексного экологического обследования памятников природы Томской области [34]. Отбор проб воды на химический анализ и определение удельной активности радона производились в первой декаде сентября при температуре воздуха +18 °С.

Физико-химический и микробиологический анализ воды выполнялся на базе Испытательной лаборатории природных лечебных ресурсов Томского научно-исследовательского института курортологии и физиотерапии. Испытания проведены на соответствие ГОСТ Р 54316–2011 «Воды минеральные природные питьевые», СанПиН 2.1.4.1074 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды», СанПиН 2.3.2.1078 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов» с использованием титриметрических, гравиметрических, электрохимических методов и следующего аналитического оборудования: весы аналитические ВЛР-200, рН-метр, иономер HANNA, вольтамперметрический анализатор СТА-1.

Содержание металлов в воде определялось в лаборатории Центра коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» Томского государственного университета методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (прибор Agilent 7500 сх, аналитики Е.В. Рабцевич, Е.И. Никитина) по методике НСАМ-ХМ № 480 – Х [35].

Определение содержания радона-222 производилось в аккредитованном Испытательном лабораторном центре ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Томской области» по методике измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс» на установочном спектрометрической МКС-01 А «Мультирад».

Действующий природоохранный статус обследованных родников определен на основе анализа официальной правоустанавливающей документации. При этом использовались как индивидуальные нормативные правовые источники, так и типовые реестры областного и муниципального уровня.

Радоновые источники являются составной частью природоохранного кластера Томского региона и нуждаются в специальной охране

Источники чистой пресной воды, издавна используемые населением в питьевых целях, являются традиционными объектами региональной системы памятников природы в Западной Сибири. К числу наиболее значимых критериев для отнесения тех или иных источников к категории памятников природы относятся бальнеологические свойства воды [36].

Охрана родников на территории г. Томска и в его ближайших окрестностях имеет свою историю, связанную с традиционным использованием и исследованием в научно-практических целях слабоминерализованных источников с содержанием радона. Эти исследования были начаты в 1904 г. профессором медицинского факультета Томского императорского университета П.П. Орловым [37] и в последующем проводились в контексте оценки бальнеологических свойств природных вод [38]. Как объекты территориальной охраны природы родники Томска и его окрестностей стали рассматриваться в 60-е годы XX столетия. В частности, общий перечень особо ценных природных объектов, подлежащих охране на территории Томской области, утвержденный решением Томского облисполкома от 28 сентября 1962 г. № 344, включал: родник Дальний ключ в историческом районе Томска «Черемошники»; три источника, расположенных в разных секторах ближнего пригорода (Звездный ключ, источник «Капитоновка», минеральный родник у 81 км ж/д Тайга-Асино в комплексе с обнажением горных пород и озерами); минеральные источники в окрестностях пос. Заварзино [39]. Количество последних ни в прошлом, ни в настоящее время не определялось. Геоэкологические исследования заварзинских родников, как ценных природоохранных объектов, не выполнялись. Статус памятника природы по решению Томского облисполкома от 14.02.75 г. № 31 получил один минеральный источник. И это при том, что район пос. Заварзино является наиболее интересным с точки зрения проявления радоновых вод [38, 40–41].

В последние десятилетия данная территория интенсивно развивается как рекреационно-дачная зона. Здесь расположено много летних оздоровительных лагерей для школьников, ведется строительство современных коттеджных поселков, широко практикуется самодельная рекреация с информационно-познавательными и собирательскими целями. И местное население, и гости из Томска пользуются родниковыми водами для питьевых нужд. При этом состояние самих родников вызывает опасение как с точки зрения качества воды, так и с точки зрения их прямой утраты вследствие техногенных нарушений вмещающего ландшафта.

Поэтому выявление и изучение природных источников в окрестностях пос. Заварзино в г. Томске является актуальным и в научном, и в практическом отношении. Только на основе современных данных о состоянии заварзинских источников можно говорить об их охране и рациональном использовании, даже если не в сугубо бальнеологических целях, что вряд ли возможно в современной ландшафтно-геохимической обстановке, то по крайней мере в качестве объектов локального питьевого водоснабжения и рекреационного природопользования.

Цели исследования радоновых источников в Томском регионе определяются актуальными задачами науки и практики

Исследования радиоактивности сибирских вод начались более 100 лет назад и связаны с деятельностью профессора Томского императорского университета П.П. Орлова, его учеников и последователей. История научных исследований радоновых источников в Томске и его окрестностях неразрывно связана с изучением природно-ресурсного потенциала Сибири в интересах социально-экономического развития региона.

Первоначально они проводились в интересах практической медицины и в целях развития в Сибири разных направлений физиотерапии и курортологии. При этом большое внимание уделялось так называемым известковым источникам, поскольку весьма популярным в то время видом физиолечения была кальциотерапия. Вот что писала по этому поводу М.П. Орлова – дочь и ученица профессора П.П. Орлова: «...кальциотерапия является одним из важнейших лечебных средств при заболеваниях мочевых путей, катаральных процессах в дыхательных путях и пищеварительных органах, при рахите и других болезнях. Известковые источники применяются также в виде ванны, благодаря их вяжущим свойствам, при многих кожных заболеваниях, экземе, чешуйчатом лишае и при различных язвах на коже. Катионам кальция приписывают каталитическое значение в жизненных процессах человеческого организма» [38, с. 353].

Особый интерес у томских ученых имел факт обнаружения радиоактивности известковых ис-

точников, обусловленной присутствием радона-222. Это способствовало их участию в научной дискуссии о лечебном уровне содержания радона в воде и оценке перспектив использования радиоактивных свойств сибирских источников. При этом отмечены следующие важные положения: наличие радиоактивности делает применение воды прямо из источника более целесообразным; вследствие специфического влияния радиоактивных веществ на ферментативные и каталитические процессы в организме нельзя исключать их физиологическое значение при небольшом содержании; слаборадиоактивные вещества также не являются безразличными для человека [38]. В целом повышенная активность природных вод Томска и его окрестностей (табл. 1) благоприятствовала исследованиям их бальнеологических свойств.

Наибольшей активностью обладал небольшой ключ у пос. Заварзино, найденный в 1911 г. профессором П.П. Орловым и впоследствии названный его именем по предложению профессора М.Г. Курлова (профессор медицинского факультета Томского императорского университета, один из инициаторов учреждения и открытия в Томске бальнеофизиотерапевтического института, ныне НИИ курортологии и физиотерапии), сделанному на заседании Общества естествоиспытателей и врачей в г. Томске. Радиоактивность этого ключа превышала приводимые П.П. Орловым [42] после поездки на Алтай данные (230 Бк/дм³) о радиоактивности Белокурихинских терм. Именно этот ключ представлял интерес в бальнеологическом отношении и специально обследовался М.П. Орловой летом 1924 г. по предложению профессора М.Г. Курлова и по поручению директора Томского физиотерапевтического института, доктора Я.З. Штамова. Но, к сожалению, после ввода в эксплуатацию водозабора томского Академгородка ключ высох, так как попал в зону действия депрессионной воронки водозабора [41, 43].

Тем не менее сохранившиеся описания этого ключа и данные о составе его воды представляют несомненный интерес в связи с кардинальным изменением природно-хозяйственной обстановки в окрестностях пос. Заварзино (г. Томск), несмотря на различия инструментально-методического обеспечения химико-аналитических работ сегодня и почти сто лет назад. Определение радиоактивных газов с помощью использовавшихся в то время электрометров-эманометров специалисты [41] считают технически исполнимым и достаточно достоверным.

По описаниям М.П. Орловой [38], рассматриваемый ключ находится недалеко от берега р. Ушайки, в полуверсте от пос. Заварзино. «Он представляет собой небольшой водоем около 1 кв. аршина в виде круглой «чашки» глубиной около ½ аршина, на дне которого виден выход ключа дебитом 32 000 литров в сутки. Определение дебита, конечно, приблизительное, так как ис-

Таблица 1. Сведения о некоторых родниках старого Томска [38]

Table 1. Information on some of the springs of the old Tomsk [38]

Название водных объектов Name of water body	Радиоактивность, Бк/дм ³ Radioactivity, Bq/dm ³	Современное состояние и использование Current status and use
Родник Дальний ключ Spring Dalniy Kluch	17–19	Практически с момента основания Томска использовался для водоснабжения местного населения. Решением Томского облисполкома от 14.02.75 № 31 объявлен памятником природы областного значения. В 2011 г. лишен статуса памятника природы по причине захламливания прилегающей территории и ухудшения качества воды. It has been used as a source of water by the population of Tomsk since its foundation. By the decision of the Tomsk regional executive committee № 31 of February 14, 1975 it was declared a natural monument of regional significance. In 2011 it was deprived of the status of natural monument of regional significance due to littered territory and deteriorated water quality
Сборный университетский колодезь University drain spring well	15	Не используются. Территория плотно застроена и давно переведена на централизованное водоснабжение. Not active. Area is densely developed. Centralized water supply is available
Колодезь на Ярлыковской улице (ул. Карташова) Yarlykovskaya Street spring well (Kartashova Street today)	7	
Колодезь за Истоком Spring well behind Istok river	10	
Ключ на берегу Ушайки (за Каменным мостом) Spring on the bank of the Ushayka river (behind the Kamenniy Most)	14	Воскресенский ключ. Находится в составе особо охраняемой природной территории «Сквер "Юность"» муниципального образования «Город Томск» Voskresenskiy spring. It is a part of specially protected natural area «Skver Yunost» of Tomsk city
Ключ у пос. Заварзино Spring near Zavarzino village	273–429	Орловский ключ. Иссяк в связи с техногенным нарушением естественных гидрогеологических условий. Orlovskiy spring. It dried up due to man-caused impact and disruption of natural hydrogeological conditions
Источник «Чаши» Spring «Chashi»	58	Таловские известковые чаши. Памятник природы Томской области с 1975 г. Популярный объект научно-познавательного туризма. Нуждается в физической охране и регулировании посещения на основе проекта рекреационного обустройства и ландшафтной организации. Talovskie lime Chashi (cup-shaped structure). It is the natural monument of Tomsk region since 1975. It is the famous tourist attraction. It requires protection and tourist management program based on recreational and landscape development project

точник растекается и заболачивает окружающую площадь, и определение производилось запруживанием его пути и наполнением небольшого ведерка через желоб. Вблизи источника местами видно отложение плотного известкового туфа» [38, с. 361]. Ключ зимой не замерзает. Температура воды, в зависимости от времени измерения, от +2 до +5,5 °С. Активирующим началом здесь является главным образом эманация радия с небольшой примесью эманации тория [38].

В сравнении результатов анализа воды ключа с современными данными по химическому составу родниковых вод в районе пос. Заварзино (табл. 2) принципиальное значение имеет более высокое содержание кальция, однако не предельное для углекислых источников Томска (до 120 мг/дм³ по р. Бордянке, до 140 мг/дм³ на Та-

ловских чашах), отлагающих травертины. Кроме того, в них отмечено более высокое содержание железа и алюминия.

В составе катионов обращает внимание высокое содержание гидрокарбонат-иона. Напротив, несколько повышенные содержания сульфатов и хлоридов в современных пробах, скорее всего, обусловлены техногенным воздействием.

Следует отметить, что М.П. Орловой в 1924 г. зафиксированы значительно более высокие показатели радиоактивности воды Орловского ключа (409–429 Бк/дм³ – табл. 2) по сравнению с данными, полученными ранее профессором П.П. Орловым (273 Бк/дм³ – табл. 1). Это можно связывать как с большей точностью проведенных измерений, так и с известной нестабильностью радоновых эманаций во времени.

Содержание радона в опробованном нами источнике ($39,5 \text{ Бк/дм}^3$) значительно ниже, чем определялось при исследовании Орловского ключа [38], но все же несколько превышает имеющиеся данные [41] о его содержании ($2\text{--}25 \text{ Бк/дм}^3$) в родниковых водах г. Томска.

Данный ключ, очевидно, был уникальным в отношении удельной активности радона-222, однако далеко не единственным. Так, М.П. Орлова [38] писала, что по р. Ушайке отмечались и менее радиоактивные ключи с содержанием радона от 3 до 87 Бк/дм^3 , а также совершенно неактивные, хотя и с низкой температурой.

Большое внимание термическому режиму ключей, а также попытки увязать присутствие радона с повышенным содержанием карбонатов в воде были связаны с объяснением происхождения этих ключей. Основываясь на имеющихся данных о геологическом строении региона, М.П. Орлова [38] отмечала, что они приурочены

к линии выхода диабазов, прорезающих глинистые сланцы по обоим берегам р. Ушайки, и выходят на поверхность из глубинных слоев по трещинам дислокаций, что соответствует одной из современных гипотез [22] транспорта радона. В этой связи радоновые источники в окрестностях Томска рассматривались как индикаторы состояния и богатств земных недр, позволяющие обнаружить присутствие разных химических элементов, в том числе «скопления радиоактивных материалов» [38, с. 364].

Минеральные радоновые воды долины р. Ушайки разведывались в середине прошлого столетия [44]. При этом было отмечено, что радиоактивные источники, выходящие по р. Ушайке, приурочены к тектоническим зонам северо-западного простирания и прослеживаются от пос. Заварзино до пос. Мирный. Водоносный горизонт сложен песчаниками и глинистыми сланцами басандайской свиты (рис. 1). Воды холодные (от $+5$ до $+6 \text{ }^\circ\text{C}$), гидрокар-



Рис. 1. Особенности геологического строения района исследований [45]

Fig. 1. Specific characteristics of geological structure of study area [45]

Таблица 2. Анализ проб воды из родников в окрестностях пос. Заварзино

Table 2. Analysis of water samples from springs in the neighborhood of Zavarzino village

Показатель Feature	Орловский ключ*	Чистый ключ**		
	Orlovskiy spring	Chistiyy (clean) spring		
	Содержание/Content			
	мг/л (mg/l)			
	мг-экв./л (mg-eq/l)			
Радиоактивность, Бк/дм ³ Radioactivity, Bq/dm ³	409–429	–	35,9	–
Сухой остаток Dry residue	325,1	–	216,5	–
K ⁺	–	–	0,73	1,04
Na ⁺	3,9	0,171	6,49	
Mg ⁺⁺	10,1	0,828	12,8	1,08
Ca ⁺⁺	106,2	5,301	77,3	3,6
Fe ⁺	0,13	0,005	0,03	–
HCO ₃ ⁻	426,9	6,998	305,0	5,0
SO ₄ ²⁻	13,7	0,285	19,4	0,4
Cl ⁻	0,4	0,011	4,3	0,12
H ₂ SiO ₃	21,9	–	20,1	–
CO ₂	76,9	–	–	–

Примечание: * – данные 1924 г. [38]; ** – данные 2014–2015 гг.

Note: * – investigated in 1924 [38]; ** – investigated in 2014–2015.

бонатно-кальциевые, пресные с минерализацией 0,36–0,77 г/дм³, радоно-радиевые средней и слабой активности. Наиболее высокое содержание радона составляет 65–130 эман [44]. При подготовке второго издания Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200 000 листа О-45-XXXII трещинно-карстовые подземные воды с содержанием радона по р. Ушайке учтены как Заварзинское проявление радоновых вод [45].

Современный неиссякаемый интерес к их изучению радоновых источников у томских ученых связан, скорее, с традиционными учебно-методическими целями [46–47] или мониторинговыми наблюдениями [48–49]. Тем не менее имеющиеся данные о химическом составе воды радоновых и травертиновых ключей Томска нельзя считать исчерпывающими.

В настоящее время в связи с сильным изменением территории по р. Ушайке в окрестностях пос. Заварзино названия и локализация ключей определяются с учетом современной природно-хозяйственной обстановки и ее определенных особенностей (рис. 2). Лишь один родник (Орловский ключ) мы можем соотнести по названию и описанию с родниками, инвентаризация и изучение которых проводились здесь почти 100 лет назад.

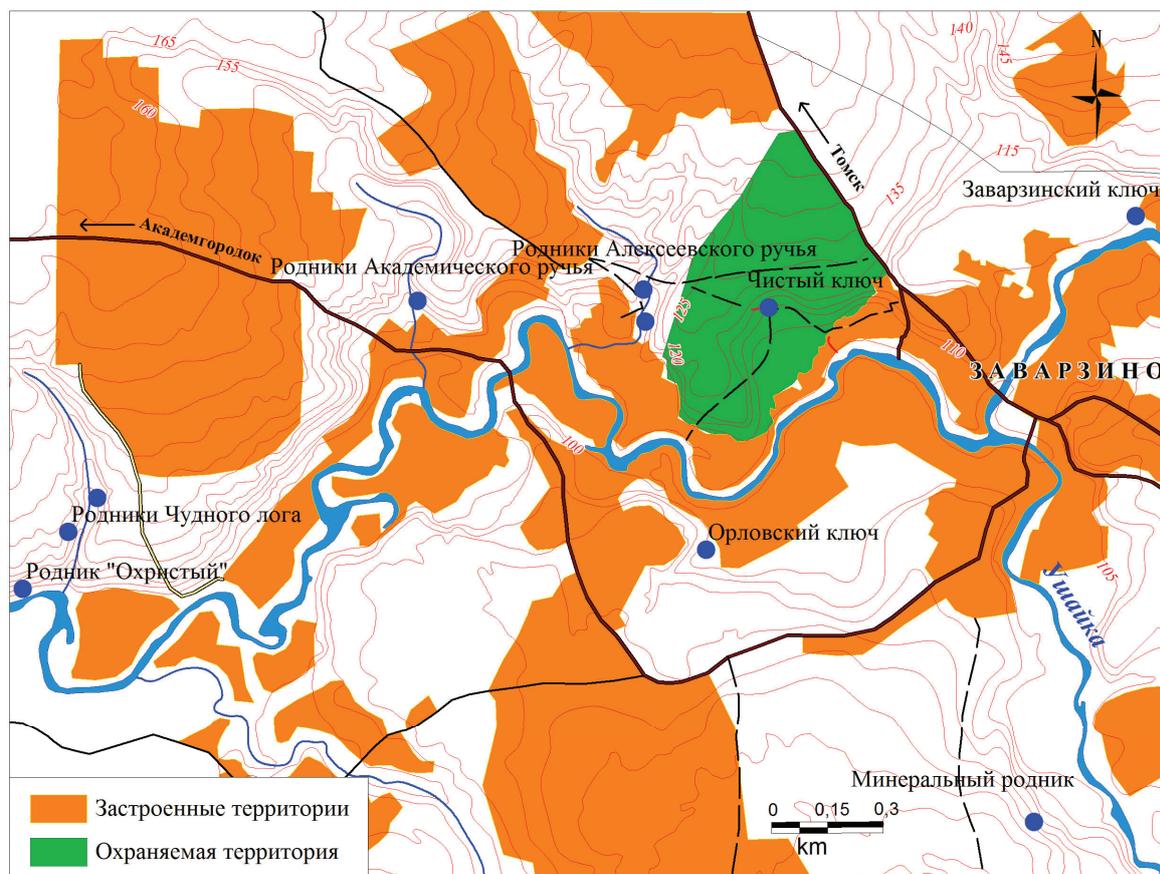


Рис. 2. Схема размещения родников в долине р. Ушайки

Fig. 2. Layout chart of spring wells in the valley of the Ushaika river

Охрана радоновых источников в Томском регионе обусловлена их экологической и хозяйственной ценностью

Радоновые родники на территории Томска являются традиционными объектами локального водоснабжения. В пригородной зоне они интенсивно посещаются и используются населением по его усмотрению, иногда оберегаются как источники чистой воды, качество которой принимается априори.

Примером такого источника в районе пос. Заварзино является родник Чистый ключ. По сравнению с другими имеющимися здесь источниками он располагается в наиболее хорошей транспортной доступности со стороны Томска и микрорайонов Академгородка, активно используется населением и подлежит защите в связи с застройкой прилегающих земель выше и ниже от него по рельефу.

Источник приурочен к правобережному участку долины р. Ушайки, имеющему вид амфитеатра с пологими склонами, и находится в окружении смешанного, преимущественно темнохвойного, леса. Присутствие радона (табл. 2) позволяет отнести его к объектам природного наследия, находящимся в сфере давних интересов томских ученых. Использование воды из родника в питьевых целях населением определяет необходимость ее оценки в отношении санитарно-гигиенического состояния и наличия каких-либо полезных свойств. И в отношении оценки уровня удельной активности радона, и в отношении состава и качества воды в роднике, кроме учета гигиенических норм и требований, интерес представляют результаты исследований других родников, находящихся в непосредственной близости от него, а также уже упоминавшихся нами, достаточно хорошо изученных родников Томска [48–49], большей частью обладающих как-либо природоохранным статусом.

Сравнительный анализ (табл. 3) показывает, что вода Чистого ключа, как и других родников в окрестностях Томска, соответствует нормативам качества воды водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, но имеет свои особенности. В отличие от других ключей в воде данного ключа больше ионов хлора, но значительно меньше кремния и цинка. В отличие от Таловских чаш, широко известных своими травертиновыми постройками, в воде Чистого ключа обнаружены минимальные содержания ионов брома, марганца, никеля, кобальта, а также менее значительные содержания кальция и магния.

Следует отметить, что в воде Воскресенского ключа, находящегося в центре Томска, отмечается несколько повышенное, по сравнению с пригородными ключами, содержание макрокомпонентов, а также превышение допустимого содержания нитратов в 3,5 раза [48–49]. Нашими данными по Воскресенскому ключу это не всегда подтверждается. Однако далее заметим, что более высокое содержание нитратов в воде Звездного ключа, по

Таблица 3. Химический состав родниковых вод
Table 3. Chemical composition of spring waters

Показатель Feature	Ед. измер. Units	Таловские чаши Talovskiyе chashi	Звездный ключ Zvezdny spring	Воскресенский ключ Voskresensky spring	Академический ключ Akademicheskyy spring	Чистый ключ* Chisty (Clean) spring
		[48, 49]				
T	°C	5,5	6,5	6,4	12,1	6
pH		7,29	7,46	6,91	7,82	7,76
Сухой ост. Dry res.	мг/л mg/l	–	–	–	–	216,5
Минерализац. Mineralization	мг/л mg/l	–	–	–	–	493,04
Перм. окисл. Permang. oxid.	мг O ₂ /л mg O ₂ /l	–	–	–	–	<0,001
F ⁻	мг/л mg/l	0,26	0,26	0,13	0,23	0,19
Cl ⁻		0,66	2,59	70,0	1,29	4,3
Br ⁻		0,32	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,05
J ⁻		–	–	–	–	<0,02
NO ₂ ⁻		< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,005
NO ₃ ⁻		< 0,05	5,76	160,0	< 0,05	2,1
PO ₄ ³⁻		< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	–
SO ₄ ²⁻		10,5	2,96	91,8	2,81	19,4
HCO ₃ ⁻		–	–	–	–	305,0
CO ₃ ²⁻		–	–	–	–	12,0
NH ₄ ⁺		–	–	–	–	0,10
K		0,53	0,67	11,4	1,49	0,72
Na		15,2	6,16	75,6	7,06	6,49
Mg		26,2	11,5	32,5	10,0	12,4–13,2
Ca		134	89,4	210	84,7	72,0–82,5
Fe		0,0026	<0,002	<0,002	0,228	0,029
Si		10,0	6,91	7,90	5,07	0,17
B		0,069	0,026	0,072	0,034	0,032
Al		<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,009
Ti		0,0015	0,0011	0,0020	0,0013	–
Mn	2,62	<0,001	0,0058	0,136	0,002	
Cu	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,001	
Se	–	–	–	–	<0,001	
Zn	0,0185	0,0161	0,0210	0,0163	0,0039	
Pb	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,001	
Ni	0,0107	0,0066	0,0089	0,0060	0,0040	
Co	0,0032	<0,001	<0,001	<0,001	0,00045	
V	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,00049	
Mo	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,00028	
Cd	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,000003	
Hg	–	–	–	–	<0,001	
Cr	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,00068	
Ag	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,00001	
Be	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,000001	
Li	0,0122	<0,005	0,0124	0,0056	0,0057	
Sb	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,00013	

Примечание: * – исследования 2014–2015 гг.

Note: * – investigated in 2014–2015.

сравнению с другими пригородными родниками, является своеобразным индикатором «результативности» проведенного здесь благоустройства, обеспечившего свободный доступ к зоне выхода ключа и формирования стекающего вниз по склону ручья.

Основными анионами, определяющими состав воды Чистого ключа, являются гидрокарбонат-ионы, присутствующие в концентрации 317,0 мг/дм³. Катионный состав воды, как и других ключей, определяют ионы кальция. Минерализация воды около 0,5 г/дм³. Реакция водной среды (рН) 7,76. Таким образом, по минерализации и ионно-солевому составу вода источника является пресной гидрокарбонатной кальциевой со слабощелочной реакцией водной среды. В этой связи, в соответствии с критериями оценки минеральных вод, установленными ГОСТ Р 54316–2011 «Воды минеральные природные питьевые», она может рассматриваться как природная минеральная питьевая столовая.

Токсичные азотсодержащие компоненты (нитраты, нитриты), кремний, фтор и микрокомпоненты (свинец, кадмий, ртуть и др.) в воде родника Чистый ключ, а также показатель перманганатной окисляемости находятся в допустимых пределах, в соответствии с ГОСТ Р 54316–2011 «Воды минеральные природные питьевые» и СанПиН 2.1.4.1074 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды», для питьевых минеральных вод. По данным санитарно-микробиологических и радиологических (радон) исследований, вода родника Чистый ключ соответствует нормам СанПиН 2.1.4.1074 по всем показателям. При этом уровень содержания радона (35,9 Бк/дм³) значительно ниже бальнеологически значимой нормы для минеральных радоновых вод наружного использования (185 Бк/дм³).

Таким образом, родник Чистый ключ на правом берегу р. Ушайки у пос. Заварзино по составу и качеству воды может быть использован населением в питьевых целях. Исследования удельной активности радона-222 в воде этого родника и других родников данного района Томска должны быть продолжены, поскольку здесь могут отмечаться более высокие уровни содержания радона в подземных водах, хотя они и нестабильны в течение года.

В настоящее время в разных регионах и странах придается особое значение охране и рациональному использованию водных ресурсов и отдельных водных объектов. Особенно это касается урбанизированных территорий с высокой концентрацией населения. Если еще в 80-е гг. в европейских странах уделялось мало внимания охране водных экосистем в городах [50], то сегодня даже в крупных столицах имеются успешные примеры [51] сохранения ценных водно-болотных угодий.

В Томске и его окрестностях родники и родни-

ковые зоны являются неотъемлемой частью ландшафтного пространства. Они определяют его колорит и функциональные возможности. Однако возможность сохранения как отдельных родников, так и целых родниковых зон, напротив, напрямую зависит от сохранности вмещающего их ландшафта [52]. Лишь в случае выделения достаточной охранной зоны можно говорить об эффективной охране водных источников [33]. В этой связи охране в месте выхода родника Чистый ключ подлежит цельный фрагмент склона долины р. Ушайки. Контур целесообразных границ охраняемой территории, ядром которой рассматривается данный родник, хорошо отбивается естественными ландшафтными рубежами и линиями транспортных коммуникаций (рис. 2). Выделенный таким образом участок (общая площадь 28,3 га) обладает экосистемной целостностью и кроме собственно родника включает достаточно крупный фрагмент долинных темнохвойных лесов, не менее ценных по причине их постепенного уничтожения в процессе длительного освоения и застройки пригородных земель.

Заключение

На основании проведенного исследования установлено:

- 1) интерес к изучению радоновых источников в Томске и его окрестностях устойчиво сохраняется на протяжении многих десятилетий, однако исходные мотивировки проводимых исследований меняются со временем;
- 2) необходимость исследований в области организации особой охраны и мониторинга радоновых источников определяется традиционным использованием их воды для нужд населения;
- 3) актуальность создания специализированных особо охраняемых природных территорий в местах выхода родников по р. Ушайке у пос. Заварзино определяется высокой хозяйственной освоенностью этой территории, ее особой популярностью как зоны рекреационно-дачного природопользования, а также существующими традициями использования родниковой воды в питьевых целях;
- 4) вопросы охраны и рационального использования конкретных источников данного района должны решаться в зависимости от условий их расположения, состава и качества воды.

Обосновывающая документация по планированию зоны территориальной охраны площадью 28,3 га на базе родника Чистый ключ в пос. Заварзино представлена в администрацию Томской области.

Исследования проводились при частичной финансовой поддержке администрации Томской области в рамках выполнения научно-исследовательских работ по теме «Комплексное экологическое обследование особо охраняемых природных территорий Томской области в 2014 году».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Radon measurements in well and spring water in Lebanon / M. Abdallah Samer, R. Habib Rima, Y. Nuwayhid Rida, M. Chatila, G. Katul // *Radiation Measurements*. – 2007. – V. 42. – Iss. 2. – P. 298–303.
2. Ahmad N., Jaafar Mohamad S., Alsaffar Mohammed S. Study of radon concentration and toxic elements in drinking and irrigated water and its implications in Sungai Petani, Kedah, Malaysia // *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. – 2015. – V. 8. – Iss. 3. – P. 294–299.
3. Radon in spring waters in the south of Catalonia / E. Fonollosa, A. Peñalver, F. Borrull, C. Aguilar // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2016. – V. 151. – P. 1. – P. 275–281.
4. Marcos Bonotto D. ²²²Rn, ²²⁰Rn and other dissolved gases in mineral waters of southeast Brazil // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2014. – V. 132. – P. 21–30.
5. Mittal S., Rani A., Mehra R. Estimation of radon concentration in soil and groundwater samples of Northern Rajasthan, India // *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. – 2016. – V. 9. – Iss. 2. – P. 125–130.
6. Shweikani R., Raja G. Natural radionuclides monitoring in drinking water of Homs city // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2015. – V. 106. – P. 333–336.
7. Рекомендации по уменьшению концентрации радона в воде родников и скважин Джаббор Расуловского района / Б.Д. Бобоев, Х.М. Назаров, Д.А. Саломов, К.А. Эрматов, В.М. Миряхяев // *Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук*. – 2015. – № 2 (159). – С. 83–86.
8. Батраков Д.В., Гапонов Д.А. Радон в воде родников г. Ростова-на-Дону // *Стратегия устойчивого развития регионов России*. – 2014. – № 19. – С. 82–85.
9. Исследование аналитических показателей воды родника Двенадцать ключей Бирского района Республики Башкортостан / Г.Г. Козлова, С.А. Онина, А.Р. Махмутов, С.М. Усманов // *Башкирский химический журнал*. – 2014. – Т. 21. – № 3. – С. 129–131.
10. Пындак В.И., Солодовников Ю.И. Радоновые источники в Жирновском районе Волгоградской области // *Проблемы региональной экологии*. – 2006. – № 1. – С. 87–92.
11. Семенищев В.С., Воронина А.В., Никифоров А.Ф. Определение радона-222 в природных источниках города Екатеринбурга // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. – 2014. – № 4. – С. 95–101.
12. Radon-222 in medicinal groundwater of Szczawno Zdroj / T.A. Przylibski, K. Mroczkowski, A. Zebrowski, P. Filbier // *Environmental Geology*. – 2001. – V. 40. – № 4–5. – P. 429–439.
13. Przylibski Tadeusz A., Gorecka J. ²²²Rn activity concentration differences in groundwaters of three Variscan granitoid massifs in the Sudetes (NE Bohemian Massif, SW Poland) // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2014. – V. 134. – P. 43–53.
14. Tole M.P. The potential of Geothermal Systems in Kenya for Balneological use // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2002. – V. 24. – № 2. – P. 103–110.
15. Елисеев В.А., Акуленко Ю.Н., Пузанов А.В. Радоновые воды Алтая и их использование в санаторно-курортной практике // *Известия Алтайского государственного университета*. – 2000. – № 3. – С. 63–65.
16. История и современность санатория «Белокуриха» / В.Г. Бегиев, О.В. Бегиев, Г.Н. Токуева, Н.Г. Яковлева, О.П. Корвякова, Т.В. Федоровская, Е.И. Лесничих // *Сборники конференций НИЦ «Социосфера»*. – Прага, 2013. – № 55. – С. 44–49.
17. Лечение профессиональных заболеваний пульмонологического профиля на естественных источниках радоновых вод Хакасии / С.И. Семенов, Р.В. Гордеева, О.В. Кузьменко, Е.А. Мартинов // *Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов*. – 2015. – Т. 2. – № 1–1. – С. 46–49.
18. Stanhope J., Weinstein Ph., Cook A. Health effects of natural spring waters: a protocol for systematic reviews with a regional case example // *Journal of Integrative Medicine*. – 2015. – V. 13. – Iss. 6. – P. 416–420.
19. Ядерно-геофизические исследования в природном парке «Налычево» (Камчатка) / П.П. Фирстов, В.А. Рашидов, А.В. Мельникова, В.И. Андреев, В.Н. Шульженкова // *Вестник Камчатского регионального учебно-научного центра. Серия: «Науки о Земле»*. – 2011. – № 17. – С. 91–101.
20. Radon activity measurements around Bakreswar thermal springs / H. Chaudhuri, K. Das Nisith, K. Bhandari Rakesh, P. Sen, B. Sinha // *Radiation Measurements*. – 2010. – V. 45. – Iss. 1. – P. 143–146.
21. Origin of radon concentration of Csalóka Spring in the Sopron Mountains (West Hungary) / Á. Freiler, Á. Horváth, K. Török, T. Földes // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2016. – V. 151. – P. 1. – P. 174–184.
22. Radon levels in groundwaters and natural radioactivity in soils of the volcanic region of La Garrotxa, Spain / V. Moreno, J. Bach, C. Baixeras, Ll. Font // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2014. – V. 128. – P. 1–8.
23. Эгембердиев С.И. Исторические памятники и лечебные родники // *Наука, новые технологии и инновации*. – 2013. – № 5. – С. 209–210.
24. Ермакова Е.Е. Почитаемые водные источники Тюменской области: типологический и функциональный анализ // *Вестник Тюменского государственного университета. Гуманитарные исследования. Humanities*. – 2013. – № 2. – С. 27–34.
25. Николаева О.П., Ким Г.В., Стародубов А.В. Сохранность родников на территории Республики Алтай // *География и природопользование Сибири*. – 2014. – № 18. – С. 129–134.
26. Lund John W. Balneological use of thermal and mineral waters in the U.S.A. // *Geothermics*. – 1996. – V. 25. – Iss. 1. – P. 103–147.
27. Klempe H. The hydrogeological and cultural background for two sacred springs, Vo, Telemark County, Norway // *Quaternary International*. – 2015. – V. 368. – P. 31–42.
28. Назаров А.Д. Родники г. Томска – распространение, состав, возможности использования и аквапаркового обустройства (краткие сведения по исторической части города) // *Известия Томского политехнического университета*. – 2002. – Т. 305. – Вып. 8. – С. 236–256.
29. Nsubuga F.B., Kansime F., Okot-Okumu J. Pollution of protected springs in relation to high and low density settlements in Kampala – Uganda // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. – 2004. – V. 29. – Iss. 15–18. – P. 1153–1159.
30. Галькина И.С., Ротанова И.Н. Развитие лечебно-оздоровительного туризма в Алтайском крае (на примере Завьяловских озер) // *География и природопользование Сибири*. – 2014. – № 18. – С. 59–64.
31. Санитарно-бактериологическая оценка качества вод в местах выходов минеральных источников долины реки Шумак (Тункинские гольцы, восточная Сибирь) / М.Ю. Суслова, О.С. Кравченко, Т.Я. Косторнова, В.В. Парфенова // *Сибирский медицинский журнал (Иркутск)*. – 2013. – Т. 117. – № 2. – С. 92–95.
32. Obrdlik P. The Longola Hot Springs of Zambia: the need for conservation // *Biological Conservation*. – 1988. – V. 43. – Iss. 2. – P. 81–86.
33. Şahin M. Hydrogeology and the Declaration of Protection Area of Tavra Springs (Sivas – Turkey) // *Procedia Earth and Planetary Science*. – 2015. – V. 15. – P. 79–84.
34. Семенова Н.М. Исследование и мониторинг памятников природы в Томской области // *Геология, геоэкология, эволюцион-*

- ная география: монография. Т. XIII // под ред. Е.М. Нестерова, В.А. Снытко. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2014. – С. 205–209.
35. Семенова Н.М. Памятники природы в системе особо охраняемых природных территорий в Западной Сибири // Охрана природы: сборник статей / под. ред. А.Е. Березина. – Томск: Изд-во НТЛ, 2000. – С. 99–113.
36. Карандашев В.К., Орлова Т.А., Лежнев А.Е. Определение элементного состава природных и питьевых вод методом ICP-MS. Методика количественного химического анализа. – М.: Изд-во ВИМС, 2006. – 40 с.
37. Лозовский И.Т., Рихванов Л.П. У истоков изучения радиоактивности и радиоактивных элементов в Сибири // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы международной конференции, посвященной столетию со дня открытия радиоактивности и столетию Томского политехнического университета. – Томск: Изд-во ТПУ, 1996. – С. 24–34.
38. Орлова М.П. Некоторые известковые и радиоактивные источники окрестностей г. Томска // Известия Томского государственного университета. – 1925. – Т. 76. – С. 353–365.
39. Природоохраняемые территории и объекты Томской области: материалы для разработки разделов «Охрана природы» в ТЭО хозяйственных проектов / Ю.А. Львов, В.В. Хахалкин, Н.Я. Несветайло, Н.М. Семенова. – Томск: Изд-во НИИ биологии и биофизики при Томском гос. университете, 1985. – 39 с.
40. Распространенность урана в природных водах юга Западной Сибири / Ю.Г. Копылова, З.В. Лосева, Е.М. Дутова, А.В. Лисица, И.В. Сметанина, Т.И. Романова // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы международной конференции, посвященной столетию со дня открытия радиоактивности и столетию Томского политехнического университета. – Томск: Изд-во ТПУ, 1996. – С. 124–126.
41. Изучение гидродинамического и гидрогеохимического режима родников г. Томска. Отчет о выполненной работе по государственным контрактам № 2-РТ-2003/31 от 16.03.2002 г. и № 26 от 14.05.2004 г. с ОГУП «Томскинвестгеонефтегаз» / науч. рук. директор ИНПЦ «Том-Аналитика» ТПУ Е.Г. Вертман. – Томск, 2004. – 201 с.
42. Орлов П.П. К вопросу о радиоактивности сибирских минеральных вод // Известия Томского государственного университета. – 1924. – Т. 74. – С. 103–125.
43. Ермашова Н.А. Минеральные воды долины реки Томи и перспективы расширения минерально-сырьевой базы // Актуальные вопросы физиотерапии и курортологии Сибири. – Томск, 1994. – С. 20–21.
44. Нуднер В.А., Смоленцев Ю.К. Геология и минеральные воды долины р. Ушайки. Отчет о работах партии № 73, проведенных в 1953–56 гг. на месторождении минеральных вод долины р. Ушайки. Т. 1. – Томск, 1957.
45. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000 (издание второе). Лист О-45-XXXII (Тайга). – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008.
46. Старов Е.Н., Мананков А.В. К вопросу изучения радона в водах родников города Томска // Материалы 56-й научно-технической конференции студентов и молодых ученых. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2010. – С. 339–342.
47. Дяба А.А., Крамынина А.К., Яковлева В.С. Радон в родниковых и артезианских водах г. Томска // Современные техника и технологии: сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Т.3. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – С. 43–45.
48. Геохимические особенности подземных родниковых вод Томского района / Д. Бэнкс, В.П. Парначёв, А.Л. Архипов, А.М. Адам, С.П. Кулижский // Современные проблемы географии и геологии: матер. III Междунар. науч.-практ. конф. с элементами школы-семинара для студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Томский государственный университет, 2014. – С. 252–255.
49. Парначёв В.П., Архипов А.Л. О некоторых геохимических особенностях подземных родниковых вод окрестностей города Томска // Роговские чтения: Проблемы инженерной геологии, гидрогеологии и геоэкологии урбанизированных территорий. Всероссийская конференция с международным участием, посвященная 85-летию со дня рождения профессора Г.М. Рогова. – Томск: Изд-во Томского архитектурно-строительного университета, 2015. – С. 49–51.
50. Kelcey Jh.G. Nature conservation, water and urban areas in Britain // Urban Ecology. – 1985. – V. 9. – Iss. 2. – P. 99–142.
51. Arguments for Integrative Management of Protected Areas in the Cities – Case Study in Bucharest City / G. Manea, E. Matei, I. Vi-julie, L. Tirlă, R., Cuculici O. Cocos, A. Tişcovschi // Procedia Environmental Sciences. – 2016. – V. 32. – P. 80–96.
52. Семенова Н.М., Амельченко В.П., Волкова И.И. Ботанико-географические особенности и перспективы сохранения уникального природного комплекса в южном пригороде г. Томска // Проблемы региональной экологии. – 2015. – № 6. – С. 49–54.

Поступила 07.04.2016 г.

Информация об авторах

Семенова Н.М., кандидат географических наук, доцент кафедры природопользования Национального исследовательского Томского государственного университета.

Назаров А.Д., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Сидорина Н.Г., руководитель Испытательной лаборатории природных лечебных ресурсов Томского НИИ курортологии и физиотерапии.

Тишин П.А., кандидат геолого-минералогических наук, руководитель ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDK 502.51(571.16)

STUDY AND PROTECTION OF RADON SPRINGS IN THE NEIGHBOR OF TOMSK

Natalya M. Semenova¹,
nmsemnv@mail.tomsknet.ru

Alexander D. Nazarov²,
nazarov@tpu.ru

Natalya G. Sidorina³,
resurs@niikf.tomsk.ru

Platon A. Tishin¹,
tishin_pa@mail.ru

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

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

³ Tomsk Research Institute of health resorts and physiotherapy,
7, Rosa Luxembourg Street, Tomsk, 634050, Russia.

Up to the present time the composition and quality of water in spring wells near Tomsk are not fully investigated. Hydrochemical and balneological properties of waters were virtually neglected. Specific activity of radon-222 in spring wells of Tomsk is 2–25 Bq/dm³. The highest levels of radon occurrence are discovered in subsurface waters of the south-east territory of Tomsk in the basin of the Ushaika river. Radon spring wells were historical source of water supply. In the suburban areas, where these springs are located, they are still used and protected by the local population as a source of clean water. Due to the intensive development of suburban areas, the radon springs and their natural surroundings are of key importance for determining ecological nets and areas requiring special protection. Radon spring wells are integral to the natural heritage of Tomsk region and they are subject to protection in relation to their location, water composition and quality.

The main aim of the study is to analyze the traditions and priorities of study and use of radon springs of Tomsk region; full geocological assessment of the most eligible radon locations outside of Tomsk in terms of ensuring their special protection.

The methods used in the study: study of literature and normative and legal sources that determine current status of radon springs as natural resource of traditional use and nature protection; mapping radon springs locations in the valley of the Ushayka River; testing springs; physical and chemical, also radiological study of spring waters.

The results. The paper introduces the results of a comparative analysis of water samples from popular spring wells of Tomsk. The authors have studied in details the spring «Chistiy Kluch» (222Rn=39,5 Bq/dm³) on the right bank of the Ushaika river near Zavarzino village. The analysis of water and surrounding territory showed that the spring is the valuable natural site requiring a status of specially protected territory of regional significance.

Key words:

Springs, nature monuments, radon waters, natural mineral water, Tomsk Region.

Research and investigations were partially financed by the administration of Tomsk as part of research work on Comprehensive Environmental Study of Specially Protected Areas of Tomsk Region in 2014.

REFERENCES

1. Abdallah Samer M., Habib Rima R., Nuwayhid Rida Y., Chatila M., Katul G. Radon measurements in well and spring water in Lebanon. *Radiation Measurements*, 2007, vol. 42, Iss. 2, pp. 298–303.
2. Ahmad N., Jaafar Mohamad S., Alsaffar Mohammed S. Study of radon concentration and toxic elements in drinking and irrigated water and its implications in Sungai Petani, Kedah, Malaysia. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 2015, vol. 8, Iss. 3, pp. 294–299.
3. Fonollosa E., Peñalver A., Borrull F., Aguilar C. Radon in spring waters in the south of Catalonia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016, vol. 151, P. 1, pp. 275–281.
4. Marcos Bonotto D. 222Rn, 220Rn and other dissolved gases in mineral waters of southeast Brazil. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, vol. 132, pp. 21–30.
5. Mittal S., Rani A., Mehra R. Estimation of radon concentration in soil and groundwater samples of Northern Rajasthan, India. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 2016, vol. 9, Iss. 2, pp. 125–130.
6. Shweikani R., Raja G. Natural radionuclides monitoring in drinking water of Homs city. *Radiation Physics and Chemistry*, 2015, vol. 106, pp. 333–336.
7. Boboev B.D., Nazarov Kh.M., Salomov D.A., Ermatov K.A., Miryakhyev V.M. Rekomendatsii po umensheniyu radona v vode rodnikov i skvazhin Dzhabbor Rasulovskogo rayona [Recommendations for reducing radon concentration in Jabor Rasulov district springs and wells water]. *News of the Academy sciences of the Republic of Tadzhikistan. Department of physical, mathematical, geological and technical sciences*, 2015, no. 2 (159), pp. 83–86.

8. Batrakov D.V., Gaponov D.A. Radon v vode rodnikov g. Rostov-na-Donu [Radon in water springs of Rostov-on-Don]. *Strategiya ustoychivogo razvitiya regionov Rossii*, 2014, no. 19, pp. 82–85.
9. Kozlova G.G., Onina S.A., Makhmutov A.R., Usmanov S.M. Issledovanie analiticheskikh pokazateley vody rodnika «Dvenadtsat klyuchey» Birskego rayona respubliki Bashkortostan [Research of analytical indicators of spring water «Twelve springs» in Birske region of the Republic Bashkortostan]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal*, 2014, vol. 21, no. 3, pp. 129–131.
10. Pyndak V.I., Solodovnikov Yu.I. Radonovye istochniki v Zhirnovskom rayone Volgogradskoy oblasti [Radon springs in Zhirnovsky area of Volgograd Oblast]. *Problemy regionalnoy ekologii*, 2006, no. 1, pp. 87–92.
11. Semenishchev V.S., Voronina A.V., Nikiforov A.F. Determination of Radon-222 in Natural Drinking Water Sources in Outskirts of Yekaterinburg. *Water sector of Russia: Problems, technologies, management*, 2014, no. 4, pp. 95–101. In Rus.
12. Przylibski T.A., Mroczkowski K., Zebrowski A., Filbier P. Radon-222 in medicinal groundwater of Szczawno Zdroj. *Environmental Geology*, 2001, vol. 40, no. 4–5, pp. 429–439.
13. Przylibski Tadeusz A., Gorecka J. 222Rn activity concentration differences in groundwaters of three Variscan granitoid massifs in the Sudetes (NE Bohemian Massif, SW Poland). *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, vol. 134, pp. 43–53.
14. Tole M.P. The potential of Geothermal Systems in Kenya for Balneological use. *Environmental Geochemistry and Health*, 2002, vol. 24, no. 2, pp. 103–110.
15. Elishev V.A., Akulenko Yu.N., Puzanov A.V. Radonovye vody Altaya i ikh ispolzovanie v sanatorno-kurortnoy praktike [The Altai radon water and its use in sanatorium and spatreatment-resort]. *The News of Altai State University*, 2000, no. 3, pp. 63–65.
16. Begiev V.G., Begiev O.V., Tokueva G.N., Yakovleva N.G., Koryakova O.P., Fedorovskaya T.V., Lesnichikh E.I. Istoriya i sovremennost sanatoriya «Belokurikha» [History and contemporaneity of health resort «Belokurikha»]. *Sborniki konferentsiy NITS «Sotsiosfera»* [Proceedings of conferences of the scientific research center «Sotsiosfera»]. Prague, 2013. No. 55, pp. 44–49.
17. Semenov S.I., Gordeeva R.V., Kuzmenko O.V., Martynov E.A. Lechenie professionalnykh zabolevaniy pulmonologicheskogo profilya na estestvennykh istochnikakh radonovykh vod Khakassii [Treatment of professional diseases of pulmonary profile on natural springs of radon waters of Khakasia]. *Kurortnaya baza i prirodnye lechebno-ozdorovitelnye mestnosti Tuvy i soprodelnykh regionov*, 2015, vol. 2, no. (1–1), pp. 46–49.
18. Stanhope J., Weinstein Ph., Cook A. Health effects of natural spring waters: A protocol for systematic reviews with a regional case example. *Journal of Integrative Medicine*, 2015, vol. 13, Iss. 6, pp. 416–420.
19. Firstov P.P., Rashidov V.A., Melnikova A.V., Andreev V.I., Shulzhenkova V.N. Nuclear-geophysical investigation in Nalychevo nature park, Kamchatka. *Bulletin of Kamchatka Regional Association «Educational-Scientific Center»*. *Earth Sciences*, 2011, no. 17, pp. 91–101. In Rus.
20. Chaudhuri H., Das Nisith K., Bhandari Rakesh K., Sen P., Sinha B. Radon activity measurements around Bakreswar thermal springs. *Radiation Measurements*, 2010, vol. 45, Iss. 1, pp. 143–146.
21. Freiler Á., Horváth Á., Török K., Földes T. Origin of radon concentration of Csalóka Spring in the Sopron Mountains (West Hungary). *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016, vol. 151, P. 1, pp. 174–184.
22. Moreno V., Bach J., Baixeras C., Font Ll. Radon levels in groundwaters and natural radioactivity in soils of the volcanic region of La Garrotxa, Spain. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, vol. 128, pp. 1–8.
23. Egemberdiev S.I. Istoricheskie pamyatniki i lechebnye rodniki [Historical monuments and healing springs]. *Nauka, novye tekhnologii i innovatsii*, 2013, no. 5, pp. 209–210.
24. Ermakova E.E. Worshipped water springs of Tyumen region: typological and functional analysis. *UT Research Journal. Humanities Research. Humanities*, 2013, no. 2, pp. 27–34. In Rus.
25. Nikolaeva O.P., Kim G.V., Starodubov A.V. Sokhrannost rodnikov na territorii Respubliki Altay [Preservation of springs in Altay region]. *Geografiya i prirodopolzovanie Sibiri*, 2014, no. 18, pp. 129–134.
26. Lund John W. Balneological use of thermal and mineral waters in the U.S.A. *Geothermics*, 1996, vol. 25, Iss. 1, pp. 103–147.
27. Klempe H. The hydrogeological and cultural background for two sacred springs, Bo, Telemark County, Norway. *Quaternary International*, 2015, vol. 368, pp. 31–42.
28. Nazarov A.D. Rodniki g. Tomsk – rasprostranenie, sostav, vozmozhnosti ispolzovaniya i akvaparkovogo obustroystva (kratkie svedeniya po istoricheskoy chasti goroda) [Springs of Tomsk – Spread, composition, possibilities of use and development of aqua park (summary on historic area of the city)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2002, vol. 305, no. 8, pp. 236–256.
29. Nsubuga F.B., Kansime F., Okot-Okumu J. Pollution of protected springs in relation to high and low density settlements in Kampala – Uganda. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2004, vol. 29, Iss. 15–18, pp. 1153–1159.
30. Galkina I.S., Rotanova I.N. Razvitie lechebno-ozdorovitel'nogo turizma v Altayskom krae (na primere Zavyalovskikh ozer) [Development of health-related tourism in Altay region (e.g. Zavyalovskie lakes)]. *Geografiya i prirodopolzovanie Sibiri*, 2014, no. 18, pp. 59–64.
31. Suslova M.Yu., Kravchenko O.S., Kostornova T.Ya., Parfenova V.V. Sanitary-bacteriological control of quality of water in exit point of mineral springs of valley of the Shumak river (the Tunkinsky Ridge, Eastern Siberia). *Medical journal of Siberia (Irkutsk)*, 2013, vol. 117, no. 2, pp. 92–95. In Rus.
32. Obrdlik P. The Longola Hot Springs of Zambia: the need for conservation. *Biological Conservation*, 1988, vol. 43, Iss. 2, pp. 81–86.
33. Şahin M. Hydrogeology and the Declaration of Protection Area of Tavra Springs (Sivas – Turkey). *Procedia Earth and Planetary Science*, 2015, vol. 15, pp. 79–84.
34. Semenova N.M. Issledovanie i monitoring pamyatnikov prirody v Tomskoy oblasti [Research and monitoring of natural monuments in Tomsk oblast]. *Geologiya, geoekologiya, evoliutsionnaya geografiya: kollektivnaya monografiya* [Geology, Geoecology, Evolutionary Geography: monograph]. St-Petersburg, RSPU Publ. house, 2014. Vol. XIII, pp. 205–209.
35. Semenova N.M. Pamyatniki prirody v sisteme osobo okhranyayemykh prirodnykh territoriy v Zapadnoy Sibiri [Nature monuments in the system of protected areas in Western Siberia]. *Okhrana prirody: sbornik statey* [Nature conservation: collection of papers]. Tomsk, NTL Publ., 2000. pp. 99–113.
36. Karandachev V.K., Orlova T.A., Lezhnev A.E. *Opreделение элементного состава природных и питьевых вод методом ICP-MS. Методика количественного химического анализа* [Determination of elemental composition of natural and drinking water by ICP-MS. Methods of quantitative chemical analysis]. Moscow, VIMS Publ., 2006. 40 p.
37. Lozovskiy I.T., Rikhvanov L.P. U istokov izucheniya radioaktivnosti i radioaktivnykh elementov v Sibiri [At the origins of researching radioactivity and radioactive elements in Siberia]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka. Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii* [Radioactivity and radioactive elements in the human environment. Proc. of Intern. Conf.]. Tomsk, 1996. pp. 24–34.

38. Orlova M.P. Nekotorye izvestkovye i radioaktivnye istochniki okrestnostey g. Tomsk [Certain calcareous and radioactive springs on the neighbors of Tomsk]. *Tomsk State University Journal*, 1925, vol. 76, pp. 353–365.
39. Lvov Yu.A., Khakhalkin V.V., Nesvetaylo N.Ya., Semenova N.M. Priridookhranyaemye territorii i obekty Tomskoy oblasti: Materialy dlya razrabotki razdelov «Okhrana prirody» v TEO khozyaystvennykh proektov [Nature protected areas of Tomsk oblast: Materials for developing «Environmental protection» sections of TEOs project]. Tomsk, Research Institute of Biology and Biophysics Publ., 1985. 39 p.
40. Kopylova Yu.G., Loseva Z.V., Dutova E.M., Lisina A.V., Smetannina I.V., Romanova T.I. Rasprostranennost urana v prirodnykh vodakh yuga Zapadnoy Sibiri [Uranium distribution in natural waters of South of West Siberia]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka. Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii* [Radioactivity and radioactive elements in the human environment. Proc. of Intern. Conf.]. Tomsk, 1996. pp. 124–126.
41. Vertman E.G., Nazarov A.D. Otchet o vypolnennykh rabotakh po programme: Izuchenie gidrodinamicheskogo i gidrokhimicheskogo rezhima rodnikov g. Tomsk [Completion report: Study of hydrodynamic and hydrogeochemical properties of springs of Tomsk]. Tomsk, 2004. 201 p.
42. Orlov P.P. K voprosu o radioaktivnosti Sibirskikh mineralnykh vod [On the issue of radioactivity of mineral waters in Siberia]. *Tomsk State University Journal*, 1924, vol. 74, pp. 103–125.
43. Ermashova N.A. Mineralnye vody doliny reki Tomi i perspektivy passhireniya mineralno-syrevoy bazy [Mineral waters of the valley of the river Tom and prospects for expanding the mineral resource base]. *Aktualnye voprosy fizioterapii i kurortologii Sibiri* [Actual issues of Physiotherapy and Health Resort in Siberia]. Tomsk, 1994. pp. 20–21.
44. Nudner B.A., Smolentsov Yu.K. *Geologiya i mineralnye vody doliny reki Ushaiki. Otchet o rabotakh partii no. 73, provedennykh v 1953–1956 na mestorozhdenii mineralnykh vod doliny reki Ushaiki* [Geology and mineral waters of the valley of the Ushaika river. Field work report of crew № 73 in 1953–1956 on the mineral water field of the valley of the Ushaika river]. Tomsk, 1957. Vol. 1.
45. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy federatsii masshtaba 1:200000* [The state geological map of the Russian Federation; scale 1:200000] St-Petersburg, Cartographic plant VSEGEI, 2008.
46. Starov E.N., Manankov A.V. K voprosu izucheniya radona v vodakh rodnikov goroda Tomsk [On the issue of studying radon in springs of Tomsk]. *Materialy 56 nauchno-technicheskoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh* [Proceedings of the 56th scientific conference of students and young researchers]. Tomsk, Tomsk State University of Architecture and Building Publ., 2010. pp. 339–342.
47. Dyaba A.A., Kramynina A.K., Yakovleva V.S. Radon v rodnikovykh i artezijskikh vodakh g. Tomsk [Radon in springs and wells of Tomsk]. *Sovremennye tekhnika i tekhnologii: Sbornik trudov XV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Modern Techniques and Technologies: Proc. of the 15th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2009, Vol. 3, pp. 43–45.
48. Banks D., Parnachev V.P., Arkhipov A.L., Adam A.M., Kulizhskiy S.P. Geokhimicheskie osobennosti podzemnykh rodnikovykh vod Tomskogo rayona [Geochemical peculiarities of underground waters in Tomsk Region]. *Sovremennye problemy geografii i geologii: Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s elementami shkoly-seminara dlya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Modern problems of geography and geology: Proc. of the 3^d International scientific and practical conference with elements of school-seminar for students, post-graduates and young scientists]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 2014. pp. 252–255.
49. Parnachev V.P., Arkhipov A.L. O nekotorykh geokhimicheskikh osobennostyakh podzemnykh rodnikovykh vod okrestnostey goroda Tomsk [On certain geochemical properties of underground spring water of the suburbs of Tomsk]. *Problemy inzhenernoy geologii, gidrogeologii i geoekologii urbanizirovannykh territoriy. Materialy Vserossiyskoy konferentsii* [Issues of engineering geology, hydrogeology and geoecology of the developed territories. Proc. of All-Russian conference]. Tomsk, Tomsk State University of Architecture and Building Publ., 2015. pp. 49–51.
50. Kelcey John G. Nature conservation, water and urban areas in Britain. *Urban Ecology*, 1985, vol. 9, Iss. 2, pp. 99–142.
51. Manea G., Matei E., Vijulie I., Tirlă L., Cuculici R., Cocos O., Tişcovschi A. Arguments for Integrative Management of Protected Areas in the Cities – Case Study in Bucharest City. *Procedia Environmental Sciences*, 2016, vol. 32, pp. 80–96.
52. Semenova N.M., Amelchenko V.P., Volkova I.I. Botanical and geographical peculiarities and preservation prospects for a unique natural landscape located in the southern suburb of the city of Tomsk. *Regional Environmental Issues*, 2015, no. 6, pp. 49–54. In Rus.

Received: 7 April 2016.

Information about the authors

Natalya M. Semenova, Cand. Sc., associate professor, Tomsk State University.

Alexander D. Nazarov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Natalya G. Sidorina, Head of the laboratory, Tomsk Research Institute of Health Resorts and Physiotherapy.

Platon A. Tishin, Cand. Sc., head of analytical center, Tomsk State University.

УДК 552.321.6:553.08

РУДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ ГАББРОИДОВ АРГЫСУКСКОГО МАССИВА (СЕВЕРО-ЗАПАД ВОСТОЧНОГО САЯНА)

Юричев Алексей Николаевич,
juratur@sibmail.com

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

Актуальность работы обусловлена необходимостью детального петрологического исследования многочисленных потенциально рудоносных мафит-ультрамафитовых массивов Канской глыбы Восточного Саяна с целью совершенствования региональных схем корреляции, а также выявления в них Pt-Cu-Ni оруденения.

Цель работы: изучение рудной специализации пород Аргысукского массива с целью доказательства обоснованности ранее сделанного предположения о существенном сходстве Талажинского и Аргысукского массивов и возможности их отнесения к единому формационному типу, а также для оценки степени потенциальной перспективности интрузива на обнаружение в нем промышленного медно-никелевого оруденения.

Методы исследования: изучение рудной минерализации в аншлифах с использованием поляризационного микроскопа Axio-Scope Carl Zeiss; диагностика химического состава рудной минерализации методом рентгеноспектрального микроанализа с применением электронного сканирующего микроскопа Tescan Vega II LMU, оборудованного энергодисперсионным спектрометром (с полупроводниковым Si (Li) детектором INCA x-sight) INCA Energy 450 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700.

Результаты. Впервые выявлены и диагностированы в габброидах Аргысукского массива рудные минералы и их вещественный состав. В ходе изучения проведено их разделение на две минеральные группы (магнетит-шпинелид-ильменитовую и сульфидную) и сделано предположение о генетической природе данных минералов. Изученная минерализация обнаруживает высокое сходство по своей специализации, минеральному набору и химизму с минерализацией габброидов Талажинского массива, что дополнительно подтверждает ранее сделанное предположение о высоком сходстве этих объектов и их единой формационной природе. Типоморфные и химические особенности сульфидов указывают на то, что их кристаллизация в габброидах происходила из исходного высокожелезистого сульфидного расплава в условиях повышенной фугитивности серы и значимой роли меди в рудной системе. Полученные результаты наряду с петрологическими особенностями позволяют предполагать высокую перспективность исследуемого массива на обнаружение Cu-Ni оруденения.

Ключевые слова:

Аргысукский массив, габброиды, рудная минерализация, химизм, сульфиды, потенциальная рудоносность.

Введение

В последние несколько десятилетий стали появляться новые данные по Pt-Cu-Ni оруденению, связанному с различными типами ультрамафит-мафитовых формаций разновозрастных подвижных поясов Центральной и Юго-Восточной Азии, охватывающих обширную территорию Южной Сибири, Казахстана, Монголии и Северного Китая [1–10], что представляет как научный, так и практический интерес. На территории Канской глыбы Восточного Саяна (рис. 1) при проведении ранее геолого-съёмочных (ГСР) и прогнозно-металлогенетических работ были выявлены многочисленные тела ультрамафитовых и мафит-ультрамафитовых интрузий, в которых неоднократно отмечалась рудная минерализация меди, никеля и благородных металлов [11–13]. В 60–80-е гг. XX в. в результате ГСР масштаба 1:50000 в пределах северо-западной части Канской глыбы Восточного Саяна был выделен Талажинский расчлененный плагиодунит-троктолит-анортозит-габбровый массив, не имеющий по своей формационной принадлежности аналогов в данном регионе. В 2007–2008 гг. в процессе поисково-разведочных работ на Pt-Cu-Ni оруденение А.Н. Смагиным был выделен небольшой по размерам габбровый Аргысукский массив, который в настоящее время мы считаем возмож-

ным сателлитом Талажинского массива, расположенного к юго-западу на расстоянии 1,5 км. Ранее проведенные комплексные петрологические исследования автора с соавторами подтвердили существенное сходство габброидов обоих массивов и позволили предположить их единую формационную принадлежность [14]. Однако структурная позиция, генезис и металлогенетическая специализация данных объектов до сих пор остаются дискуссионными.

Целью настоящего исследования является изучение рудной минерализации габбровой серии пород Аргысукского массива для выяснения ее специализации и сравнения с рудными минералами габброидов Талажинского массива, а также для оценки степени перспективности исследуемого интрузива на обнаружение в нем промышленного медно-никелевого оруденения.

Краткая геологическая характеристика исследуемого массива

Аргысукский габбровый массив выделен в самостоятельный объект в 2008 г. из Малодизинского плутона, который в настоящее время также требует всестороннего изучения в силу его противоречивой комплексной и возрастной трактовки: пи-

роксенит-габбровый – E_{2-3} по [15], манский существенно габбровый – E_{1-2} (по результатам ГСР 1978–1981 гг. на Кингашской площади под руководством А.Н. Смагина), кулибинский анортозит-пироксенит-габбровый – PR_1 (в легенде к геологической карте района 1:50000). Непосредственно возраст Аргысукского массива не определялся.

Массив расположен северо-восточнее Талажинского плутона на водоразделе истоков рр. Аргысук и Анжа (рис. 1), имеет на поверхности округлую форму ($3 \times 3,5 \text{ км}^2$) и сложен исключительно габброидами. Однако характер аэромагнитного поля

на исследуемой территории (по данным А.Н. Смагина, 2008 г.), указывает на наличие в нижней его части пластины ультрамафитов и их практически полную сохранность в результате крайне слабого современного эрозионного среза последних. Учитывая, что весь Аргысукский массив полностью находится в контурах контрастной аэромагнитной аномалии, характеристики которой свойственны только рудоносным ультрамафитам в пределах Канской глыбы, а также наличие по результатам ГСР 1978–1981 гг. контрастного по содержанию ($0,01 \%$) и короткого ($1,5 \text{ км}$) потока рассеяния

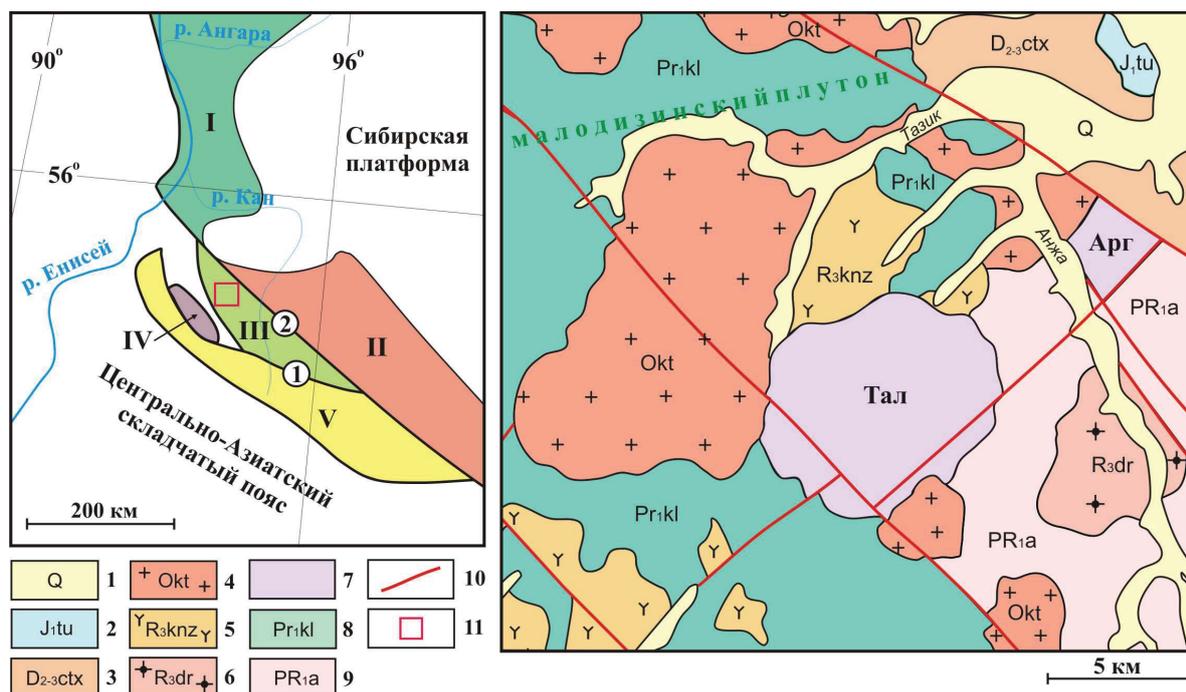


Рис. 1. Геологическая карта района локализации Аргысукского массива в пределах Канской глыбы и ее положение в региональной структуре (составлено по материалам А.Н. Смагина, А.В. Ренжина, А.Г. Еханина, А.Д. Ножкина, О.М. Туркина, А.И. Чернышова): 1 – четвертичная аллювиальная терригенная формация; 2 – юрская терригенно-угленосная формация: переяславская свита; 3 – средне-верхнедевонская карбонатно-терригенная формация: павловская, кунгусская свиты; 4 – ордовикская лейкогранитовая формация: кутурчинский комплекс; 5 – позднерипейская габбро-сиенитовая формация: кинзельюкский (казырский) комплекс; 6 – позднерипейская (?) формация микроклиновых гранитов: дербинский, широкологский комплексы (возможно, полихронная); 7 – позднерипейская плагиодунит-троктолит-габбро-анортозитовая формация: Талажинский (Тал) и Аргысукский (Арг) массивы; 8 – раннепротерозойская (?) перидотит-пироксенит-габбровая формация: кулибинский комплекс (очевидно, полихронный); 9 – раннепротерозойская (?) орьинская толща, преимущественно амфиболитовая с метакоматиитами; 10 – тектонические нарушения; 11 – расположение района исследования в Канской глыбе. На врезке положение Канской глыбы в структурах юго-западного обрамления Сибирской платформы. Выступы кристаллического фундамента платформы: I – Ангаро-Канский; II – Присаянский. Докембрийские структуры складчатого обрамления: III – Канский блок; IV – Арзыбейский блок; V – Дербинский блок. Разломы (цифры в кружках): 1 – Главный Восточно-Саянский; 2 – Канско-Агульский

Fig. 1. Geological map of the area of Argysuksky massif localization within the Kan block and its position in regional structure (drawn by the data of A.N. Smagin, A.V. Renzhin, A.G. Ekhanin, A.D. Nozhkin, O.M. Turkina, A.I. Chernyshov): 1 is the quaternary alluvial terrigenous formation; 2 is the Jurassic terrigenous-coal formation: pereyaslav strata; 3 is the middle Upper Devonian terrigenous-carbonate formation: pavlovskaya, kungusskaya strata; 4 is the Ordovician leucogranite formation: kuturchinsky complex; 5 is the late Riphean gabbro-syenitic formation: kinzelyuksky (kazyrsky) complex; 6 is the late-Riphean (?) formation of microcline granites: derbinsky, shirokologsky complexes (probably polychromous); 7 is the late-Riphean plagiodunite-tractolite-gabbro-anorthite formation: Talazhinsky (Tal) and Argysuksky (Arg) complexes; 8 is the Early Proterozoic (?) peridotite-pyroxenite-gabbro formation: kulibinsky complex (obviously polychromous); 9 is the Early Proterozoic (?) oryinskaya formation, essentially amphibolitic with metakomatiites; 10 is the tectonic deformations; 11 is the position of the area under study in the Kan block. The inset map demonstrates the position of the Kan block in the structures of South-West framing of Siberian platform. Highs of platform crystalline basement: I – Angara-Kansk; II – Sayan. Pre-Cambrian folded framing structures: III – Kan block; IV – Arzybaysky block; V – Derbinsky block. Faults (the numbers are in circles): 1 – Main East-Sayan; 2 – Kansk-Agulsk

Ni, можно выделить ультрамафиты массива, скрытые на глубине под превалирующими на поверхности габбро, в ранг весьма перспективных на обнаружение промышленных концентраций Cu и Ni.

Габброиды массива представлены от меланократовых (оливин-пироксен-роговообманковых) до лейкократовых (преимущественно плагиоклазовых) разностей, которые в различной степени подверглись вторичным преобразованиям (амфиболитизации, хлоритизации). Они обычно имеют массивную текстуру, однако в лейкократовых разностях нередко обнаруживают трахитоидную, обусловленную субпараллельной ориентировкой призматических зерен плагиоклаза. Основная масса мелко-, среднезернистая габбро-офитовая с размерами зерен 1...3,5 мм. Габбро сложены главным образом оливином – хризолитом (Fa₁₉₋₂₁) ~5...25 %, плагиоклазом – лабрадором (An₅₇₋₇₀) ~50...70 % и клинопироксеном – до 30 %, встречаются коричнево-бурая роговая обманка, биотит. Из вторичных минералов отмечаются уралит, актинолит и хлорит. Рудные минералы распределены неравномерно и занимают до 5 %.

Методика исследования

Рудные минералы в габброидах Аргысукского массива изучались в проходящем и отраженном свете на поляризационном микроскопе Аxiоссop 40 Pol. Анализ их вещественного состава выполнен методом рентгеноспектрального микроанализа [16] на электронном сканирующем микроскопе Tescan Vega II LMU, оборудованном энергодисперсионным спектрометром (с детектором Si (Li) Standard) INCA Energy 350 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700 в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» ТГУ (г. Томск). Для этого из отобранных образцов пород с рудной минерализацией были изготовлены плоскопараллельные аншлифы толщиной 3...4 мм по рекомендуемым методикам [16]. Перед проведением анализов на исследуемые поверхности предварительно напыляли слой углерода толщиной 25...30 нм. Последующие расчеты химических составов проводились по программе INCA-Issue 18b и по дополнительным авторским программам.

Рудная минерализация

Изучение рудной минерализации в габброидах Аргысукского массива позволило выделить по составу рудных минералов два основных типа минерализации: магнетит-шпинелид-ильменитовую и сульфидную. При этом в меланократовых разностях габбро отмечается некоторое преобладание сульфидной минерализации над магнетит-шпинелид-ильменитовой (60 % к 40 %), а в лейкократовых разностях – наоборот.

Магнетит-шпинелид-ильменитовая минерализация представлена шпинелидами, магнетитом, манганоильменитом, ильменитом и гематитом.

Шпинелиды образуют дискретные обособленные зерна, выделяющиеся высокой степенью идиоморфизма, местами с хорошо выраженными гранями. Отдельные из них характеризуются октаэдрическими либо квадратными габитусами (рис. 2, а–б). Размеры таких зерен составляют до 1,0 мм. Согласно классификации [17], шпинелиды по химическому составу соответствуют наиболее окисленной разновидности – хроммагнетиту. В химическом составе часто обнаруживается примесь титана (до 1,13 %) и ванадия (до 0,23 %) и постоянное присутствие алюминия (до 0,66 %) (табл. 1).

Таблица 1. Химический состав хроммагнетита и магнетита из габброидов Аргысукского массива, мас. %

Table 1. Chemical composition of chrome-magnetite and magnetite from gabbros of Argysuksky massif, wt. %

Минерал Mineral	Хроммагнетит Chrome-magnetite				Магнетит Magnetite					
	Образец Sample	151-1-3	151-1/3-1	151-1/3-2	151-1/2-4	151-1/2-1	151-1/2-2	2144-3-1	2144-3-2	2144-3-3
O	24,98	23,77	24,40	24,18	23,51	23,76	23,02	23,31	23,19	
Mg	–	0,36	–	–	–	–	–	–	–	
Al	0,22	0,66	0,36	0,22	0,24	–	–	0,28	–	
Ti	1,13	0,82	0,22	–	–	–	–	0,38	–	
V	–	0,23	–	0,23	0,20	–	0,27	0,21	0,22	
Cr	1,28	2,56	1,75	0,96	–	–	0,45	0,48	0,48	
Fe	72,38	71,60	73,27	74,41	76,06	76,24	76,26	75,33	76,10	

Примечание. Здесь и далее определение химического состава осуществлялось на электронном сканирующем микроскопе Tescan Vega II LMU, оборудованном энергодисперсионным спектрометром (с детектором Si (Li) Standard) INCA Energy 350 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700 в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» ТГУ (г. Томск), оператор А.С. Кульков. Химические составы приведены к 100 %.

Note. Hereinafter chemical composition was determined on electron scanning microscope «Tescan Vega II LMU» equipped with energy-dispersive spectrometer (with detector Si (Li) Standard) INCA Energy 350 and wave-dispersive spectrometer INCA Wave 700 at TPU «Analytic center of natural system geochemistry» (Tomsk), the operator is A.S. Kulkov. The chemical compositions are given to 100 %.

Магнетит отмечается в виде самостоятельных обособленных мелких (0,2...0,8 мм) зерен овальной и неправильной формы, а также в виде крупных (до 5,0 мм) агрегативных магнетит-ильменитовых выделений (рис. 2, в, д–е). Последние, очевидно, являются продуктом замещения исходных магматических хромшпинелидов. По химизму зерна второй генерации отличаются постоянным присутствием небольшого содержания хрома (0,45...0,48 %). В магнетитах обеих генераций нередко обнаруживается присутствие ванадия (до 0,27 %), реже – алюминия (до 0,28 %) (табл. 1).

Ильменит встречается в виде линзочек, удлиненно-таблитчатых зерен размером до 0,2 мм вдоль зонк трещиноватости и в краевых частях зерен хроммагнетита (рис. 2, б) либо в виде агрегативных скоплений с магнетитом (о чем упоминалось выше).

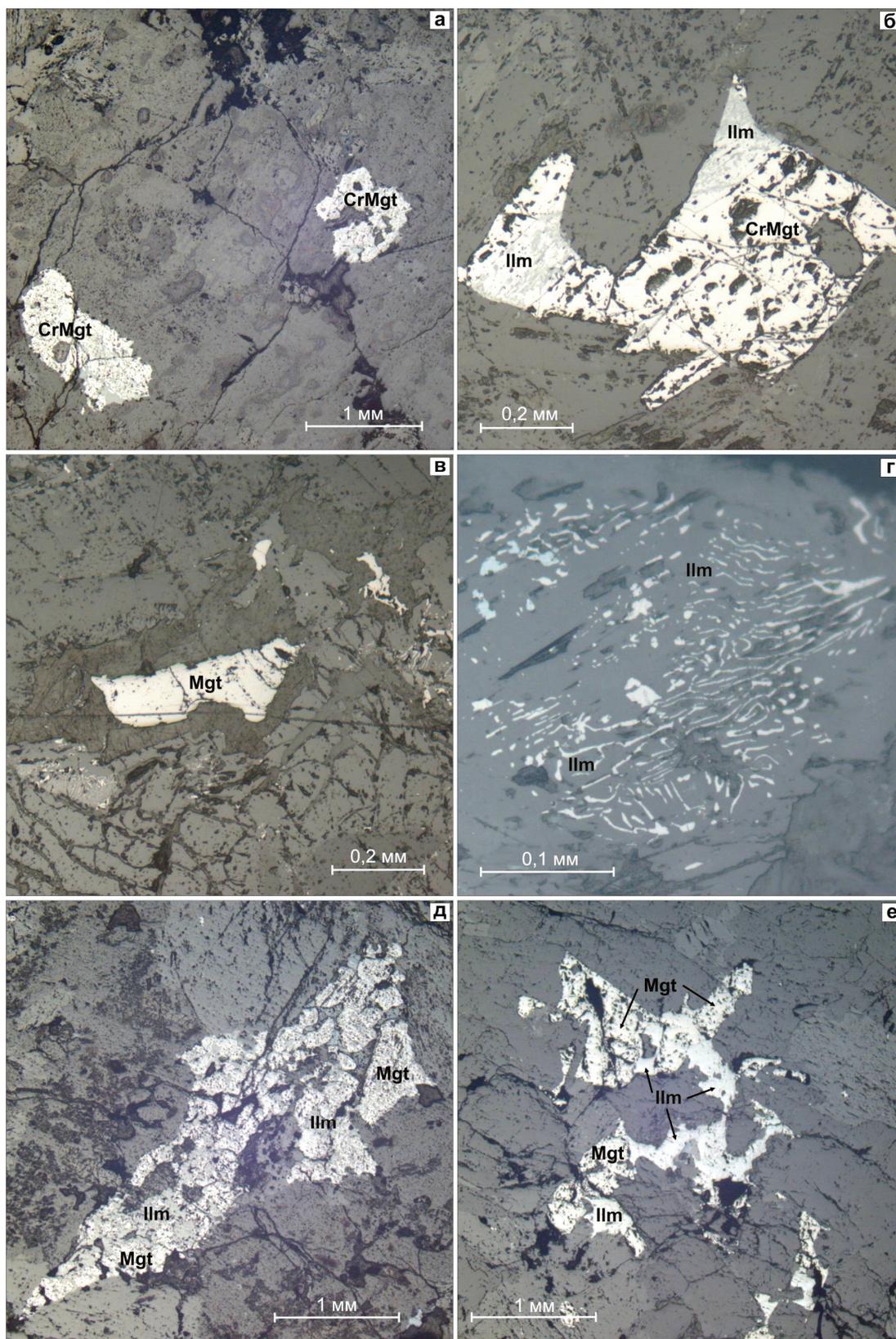


Рис. 2. Магнетит-шпинелид-ильменитовая минерализация в габброидах Аргысуцкого массива (аншлифы). Mgt (CrMgt) – магнетит (хроммагнетит), Ilm – ильменит

Fig. 2. Magnetite-spinelide-ilmenite mineralization in gabbros of Argysuisky massif (polished sections). Mgt (CrMgt) is the magnetite (chrome-magnetite), Ilm is the ilmenite

Отмечены переотложенные скелетные формы минерала, образующие специфические дактилоскопические структуры (рис. 2, *г*), наблюдаемые ранее в других геологических объектах [18].

Ильменит, развивающийся по хроммагнетиту, характеризуется повышенным содержанием марганца (до 5,24 %, табл. 2) и отнесен автором к манганоильмениту. Ранее подобная разновидность отмечалась в габброидах Талажинского массива [19–20].

Нередко ильмениты из агрегативных магнетит-ильменитовых выделений обнаруживают в своем химическом составе примесь магния (до 1,98 %), которая отсутствует в манганоильменитах (табл. 2).

Гематит, имеющий, очевидно, постмагматическую гидротермальную природу, отмечается в виде венцовых кайм замещения шириной до 0,04 мм вокруг зерен пирита (рис. 3, *з-е*). В его химическом составе постоянно устанавливается примесь никеля (0,26...1,19 %, табл. 3).

Таблица 2. Химический состав ильменитов из габброидов Аргысукского массива, мас. %

Table 2. Chemical composition of ilmenites from gabbros of Argysuksky massif, wt. %

Минерал Mineral	Ильменит Ilmenite						Манганоильменит Manganoilmenite	
	Образец Sample	151-1-1	151-1-2	151-1/2-3	41/5-1-1	41/5-1-2	41/5-3-3	2144-3-4
O	29,75	30,07	30,33	30,78	30,84	30,42	29,70	29,50
Mg	1,24	0,50	1,98	-	-	-	-	-
Ti	30,34	30,17	30,84	32,59	30,62	31,17	32,80	32,57
Mn	0,62	0,73	1,50	2,36	2,15	2,07	5,24	4,95
Fe	38,05	38,52	35,35	34,26	36,40	36,36	32,25	32,98

Таблица 3. Химический состав гематита в измененных габброидах Аргысукского массива, мас. %

Table 3. Chemical composition of hematite in altered gabbros of Argysuksky massif, wt. %

Минерал/Mineral	Гематит/Hematite			
Образец/Sample	2127-2	2127-4	2144-1-3	2144-2-3
O	34,70	32,78	33,33	34,92
Fe	64,93	66,93	66,41	63,89
Ni	0,37	0,30	0,26	1,19

Сульфидная минерализация отмечаются довольно часто в виде мелкой вкрапленности (0,1...0,4 мм) в основной матрице породы и выполнена пирротинном, пентландитом, халькопиритом и пиритом. При этом в меланократовых разновидностях габброидов минерализация представлена пирротин-пентландит-халькопиритовой триадой с преобладанием пирротина, а в лейкократовых разновидностях и измененных (амфиболитизированных, хлоритизированных) габброидах – преимущественно «сыпью» пирита.

Пирротин является самым распространенным сульфидом, имеет светло-желтый цвет с коричнево-розовым, кремовым оттенком, отражательная способность высокая. Он отмечается в виде капле-

видных зерен (0,2...0,4 мм) в ассоциации с пентландитом, образуя структуры распада твердых растворов, а также формирует тройную ассоциацию с пентландитом и халькопиритом (рис. 3, *а-в*). Химический состав минерала близок его стехиометрической формуле (табл. 4).

Таблица 4. Химический состав сульфидной минерализации из габброидов Аргысукского массива, мас. %

Table 4. Chemical composition of sulphide mineralization from gabbros of Argysuksky massif, wt. %

Минерал Mineral	Образец Sample	S	Fe	Ni	Co	Cu
Пирит/Pyrite	2127-1	53,89	46,11	-	-	-
	2144-1-2	53,06	46,94	-	-	-
	2144-2-1	53,00	47,00	-	-	-
	2144-2-2	53,42	46,58	-	-	-
Со-пирит/Co-pyrite	2127-3	52,89	44,69	-	2,43	-
	151-2-1	36,78	63,22	-	-	-
Пирротин Pyrrhotite	151-2-2	38,83	61,17	-	-	-
	151-2-3	36,40	63,60	-	-	-
	151-2-4	39,55	60,45	-	-	-
	151-3-2	36,42	63,58	-	-	-
	151-4-1	36,45	63,55	-	-	-
	151-4-2	36,48	63,52	-	-	-
	151-4-3	36,61	63,39	-	-	-
	Ni-пирротин Ni-pyrrhotite	151-3-1	39,41	58,90	1,69	-
Халькопирит Chalcopyrite	2144-1-1	34,68	30,69	-	-	34,64
Железистый халькопирит Glandular chalcopyrite	151-3-2-1	35,33	41,15	-	-	23,52
	151-3-2-2	35,21	40,94	-	-	23,86
	151-4-4	35,21	40,49	-	-	24,30
Пентландит Pentlandite	151-3-3	33,99	36,24	27,14	2,63	-
	151-3-4	33,82	36,19	27,07	2,92	-

Пентландит, наряду с пирротинном, является наиболее распространенным сульфидом в изученных габброидах. Он преимущественно наблюдается в виде пламевидных, веретенообразных включений распада внутри пирротина; реже образует обособленные мелкие зерна треугольной, округлой формы. Размеры таких зерен не превышают 0,1 мм, в них часто отмечается весьма отчетливая октаэдрическая спайность по системе (111). Цвет минерала бело-желтый, отражательная способность высокая. Пентландит характеризуется повышенной железистостью и постоянно обнаруживает в составе примесь кобальта (2,63...2,92 %, табл. 4).

Халькопирит распространен не так широко, как два предыдущих сульфида. Обычно он образует мелкие самостоятельные зерна до 0,05 мм вблизи пирротин-пентландитовых обособлений либо представлен в виде аллотриоморфных агрегатов в ассоциации с пирротинном и пентландитом (рис. 3, *б-в*). В метагаббро отмечается развитие по самостоятельным зернышкам халькопирита каемок пирита, которые, в свою очередь, замещаются каймой гематита (рис. 3, *г*).

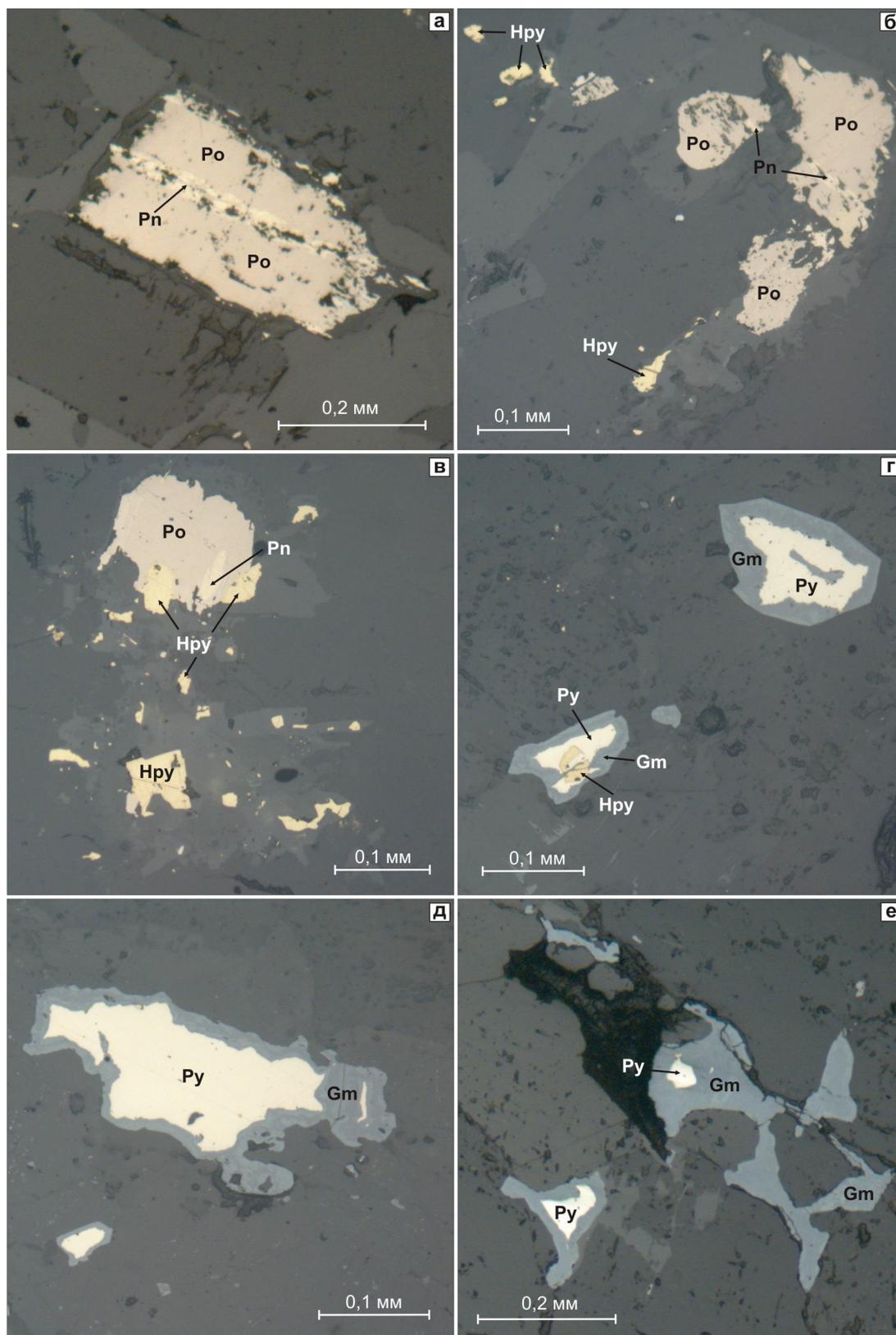


Рис. 3. Сульфидная минерализация в габброидах Аргысукского массива (аншлифы). Po – пирротин, Pn – пентландит, Hpy – халькопирит, Py – пирит, Gm – гематит

Fig. 3. Sulfide mineralization in gabbros of Argysuksky massif (polished sections). Po is the pyrrhotite, Pn is the pentlandite, Hpy is the chalcopyrite, Py is the pyrite, Gm is the hematite

По химическому составу самостоятельные зерна халькопирита, в отличие от халькопирита из триады, характеризуются высокой близостью своей стехиометрической формуле. В тройной ассоциации минерал отклоняется от своего стехиометрического состава повышенными содержаниями железа (до 41,15 %) при пониженных содержаниях меди (23,52...24,30 %).

Пирит формирует самостоятельные мелкие округлые и неправильные зерна размером до 0,3 мм в основной силикатной матрице породы (рис. 3, *г-е*). Они имеют светло-желтый, соломенно-желтый цвет и высокую отражательную способность. Рельеф неровный, бугристый, пузырчатый. Зерна часто корродированы в краевых частях, что позволяет судить об агрессивности метасоматической среды, в которой минерал перекристаллизовывался. Химический состав пирита близок своей стехиометрической формуле (табл. 4).

Обсуждение результатов и выводы

Впервые выявлены и диагностированы в габброидах Аргысукского массива рудные минералы и их вещественный состав. В ходе изучения проведено их разделение на две минеральные группы: магнетит-шпинелид-ильменитовую и сульфидную. Аналогичная по специализации рудная минерализация ранее была описана в габброидах (троктолитах, оливиновых габбро) Талажинского массива [19–20]. Это также, наряду с ранее проведенными петрологическими исследованиями, свидетельствует в пользу большой схожести данных интрузивов.

Химические составы сульфидов обоих массивов хорошо сопоставляются и отвечают единому эволюционному тренду (рис. 4). В габброидах обоих объектов выявлен и изучен манганоильменит. Однако в породах Аргысукского массива, в отличие от таких пород Талажинского массива,

хромшпинели представлены только хроммагнетитом. Отсутствие более ранних разновидностей хромшпинелидов, очевидно, связано с большей степенью метаморфического преобразования пород, а также с ограниченным числом изученных образцов. Автор допускает, что при дальнейших изучениях их число может расширяться.

Проведенные исследования позволяют предположить, что формирование сульфидной минерализации происходило из высокожелезистого сульфидного расплава, который в процессе ликвации выделился из родоначального магматического расплава и претерпел последующую дифференциацию в процессе становления массива. При понижении температуры из него происходила близкая по времени кристаллизация зерен пирротина и пентландита, в том числе с образованием ряда твердых растворов между этими двумя минералами. Частое присутствие совместно с пирротин и пентландитом халькопирита, а также наличие раннего железистого халькопирита, очевидно, свидетельствует о повышенной фугитивности серы и значимой роли меди в системе на момент кристаллизации габброидов и, как следствие, ранней кристаллизации данного минерала наряду с пирротин-пентландитовыми выделениями.

Отмечаемая сыпь зерен пирита в метагаббро, вероятнее всего, является продуктом замещения зерен халькопирита и пирротина под действием постмагматических гидротермальных процессов. Под действием этих же процессов с резким повышением концентрации кислорода происходит развитие кайм гематита вокруг зерен пирита, вплоть до полного замещения последнего.

Согласно гравитационной модели наибольшее накопление сульфидов происходит в результате опускания капель сульфидной жидкости из головы магматической колонны в придонные части магматической камеры и их сегрегации в струк-

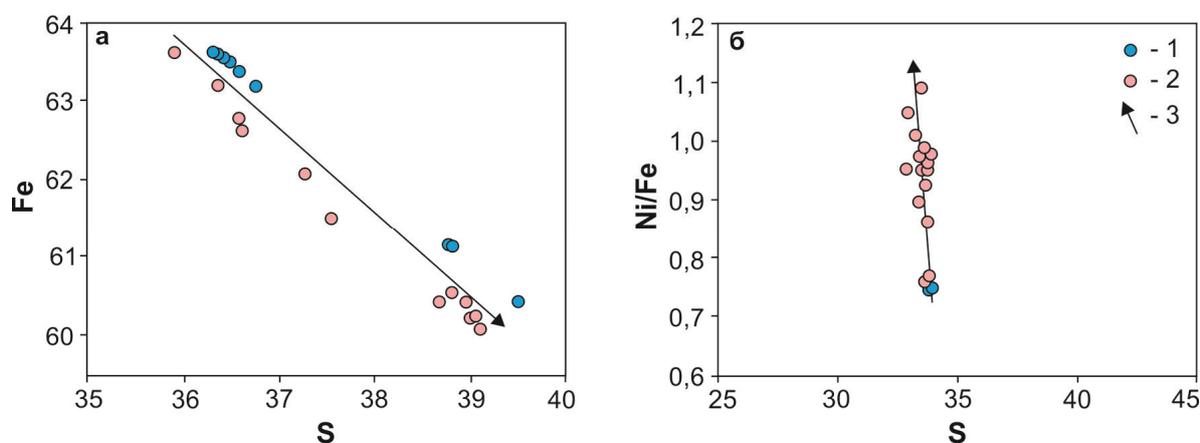


Рис. 4. Бинарные диаграммы для пирротинов (а) и пентландитов (б) из габброидов Аргысукского и Талажинского массивов: 1 – Аргысукский массив, 2 – Талажинский массив, 3 – эволюционный тренд изменения составов

Fig. 4. Binary diagrams for pyrrhotines (a) and pentlandites (b) from gabbro of Argysuksky and Talazhinsky massifs: 1 is the Argysuksky massif, 2 is the Talazhinsky massif, 3 is the evolutionary trend of change in compositions

турных ловушках в результате гравитационной дифференциации [21]. Принимая во внимание, что аэромагнитной разведкой доказывается наличие перекрытого габброидами тела ультрамафитов в основании Аргысукского массива, такая модель указывает на потенциальную их рудоносность. При этом исследуемый массив, в отличие от Талажинского массива, характеризуется меньшим эрозийным срезом, что позволяет ожидать полную сохранность потенциального Cu-Ni оруденения в его придонной ультрамафитовой части.

В пользу высокой потенциальной рудоносности Аргысукского массива также свидетельствует его значительное сходство с эталонным Талажинским массивом плагиодунит-троктолит-анортозит-габбрового состава, который в настоящее время относится к рифейской дунит-троктолит-габбровой никеленой формации [13, 19–20]. Наиболее характерными представителями данной формации являются троктолит-анортозитовые массивы Дулут, Войсес-Бей и Маскок (Канада), Джинчуан (Китай) и Никеландия (Бразилия) [21]. Интрузии этой формации сейчас рассматриваются в качестве перспективных источников рифейской эпохи платинометалльно-медно-никелевого рудообразования [22–23].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Платиноносность ультрамафит-мафитов Монголии и Тувы / Л.В. Агафонов, Ж. Лхамсурэн, К.С. Кужугет, Ч.К. Ойдул. – Улаанбаатар: Монгольский государственный университет науки и технологии, 2005. – 224 с.
2. Mineralogy and geochemistry of the Tartai massif, East Siberian metallogenic province / M.Y. Podlipsky, N.D. Tolstykh, A.V. Vishnevskiy, G.V. Polyakov, A.S. Mekhonoshin // *Geology of Ore Deposits*. – 2015. – V. 57. – № 3. – P. 172–196.
3. Ernst R.E. Large igneous province. – Cambridge: Cambridge University Press, 2014. – 654 p.
4. Ore mineralogy of PGM placer in Siberia and the Russian Far East / N. Tolstykh, A. Krivenko, E. Sidirov, K. Laajoki, M. Podlipsky // *Ore Geol. Rev.* – 2002. – V. 20. – P. 1–25.
5. Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V. Mantle plumes of Central Asia (northeast Asia) and their role in forming endogenous deposits // *Russian Geology and Geophysics*. – 2014. – V. 55. – № 2. – P. 120–143.
6. Юричев А.Н. Идарский ультрамафитовый комплекс Восточного Саяна: петрогеохимические особенности и вопросы рудоносности // *Отечественная геология*. – 2014. – № 6. – С. 56–66.
7. Pirajno F., Santosh M. Rifting, intraplate magmatism, mineral systems and mantle dynamics in Central-East Eurasia: an overview // *Ore Geol. Rev.* – 2014. – V. 63. – P. 265–295.
8. Ultramafic-mafic igneous complexes of the Precambrian East Siberian metallogenic province (southern framing of the Siberian craton): age, composition, origin, and ore potential / G.V. Polyakov, N.D. Tolstykh, A.E. Izokh, M.Y. Podlipskii, A.S. Mekhonoshin, T.B. Kolotilina, D.A. Orsoev // *Russian Geology and Geophysics*. – 2013. – V. 54. – № 11. – P. 1319–1331.
9. Черкасова Т.Ю., Мазуров А.К., Чернышов А.И. Потенциальная рудоносность расслоенных мафит-ультрамафитовых массивов Нижнедербинского комплекса (СЗ Восточного Саяна) // *Известия Томского политехнического университета*. – 2010. – Т. 317. – № 1. – С. 20–27.
10. Field Relationships and Geochemical Constraints on the Emplacement of the Jinchuan Intrusion and its Ni-Cu-PGE Sulfide Deposit, Gansu, China / J. Lehmann, N. Arndt, B. Windley, M.-F. Zhou, C.Y. Wang, C. Harris // *Econ. Geol.* – 2007. – V. 102. – P. 75–94.
11. Платиноносность ультрабазит-базитовых комплексов Юга Сибири / под ред. В.И. Богнибова, А.П. Кривенко, А.Э. Исоха и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 1995. – 151 с.
12. Зеленокаменные пояса юго-западного обрамления Сибирской платформы и их металлогения / Т.Я. Корнев, А.Г. Еханин, В.Н. Князев, С.К. Шарифулин. – Красноярск: КНИИГиМС, 2004. – 176 с.
13. Юричев А.Н. Мафит-ультрамафитовый магматизм Канской глыбы и его рудный потенциал, Северо-Запад Восточного Саяна // *Руды и металлы*. – 2013. – № 3. – С. 11–20.
14. Юричев А.Н., Чернышов А.И. Талажинский и Аргысукский массивы: общность петролого-геохимических черт (северо-запад Восточного Саяна) // *Известия Томского политехнического университета*. – 2015. – Т. 326. – № 1. – С. 40–49.
15. Ящук В.И. Магматические комплексы зоны Манского разлома (Восточный Саян): дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Канск, 1975. – 124 с.
16. Reed S.J.B. Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology. – N.Y.: Cambridge University Press, 2005. – 189 p.
17. Павлов Н.В. Химический состав хромшпинелидов в связи с петрографическим составом пород ультраосновных интрузивов // *Труды Геологического института РАН*. – 1949. – Вып. 103. – № 3. – 91 с.
18. Рамдор П. Рудные минералы и их сростания. – М.: Иностранная литература, 1962. – 1132 с.
19. Юричев А.Н. Геолого-генетическая модель образования и потенциальная рудоносность мафит-ультрамафитовых массивов талажинского и кулибинского комплексов Восточного Саяна:

- автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 22 с.
20. Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Konnikov A.E. The Talazhin plagioclone-troctolite-anorthosite-gabbro massif (East Sayan): petrogeochemistry and ore potential // Russian Geology and Geophysics. – 2013. – V. 54. – № 2. – P. 166–180.
 21. Naldrett A.J. Magmatic sulfide deposits: geology, geochemistry and exploration. – Berlin: Springer, 2004. – 727 p.
 22. Кислов Е.В. Рифейская платинометалльно-медно-никелевая металлогеническая эпоха: факторы рудообразования // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Вып. 7. – Томск: ЦНТИ, 2009. – С. 328–338.
 23. Кислов В.Е., Конников Э.Г. Рифейская эпоха платинометалльно-медно-никелевого рудообразования // Проблемы геологии и геохимии юга Сибири. – Томск: Изд-во ТГУ, 2000. – С. 67–72.
 24. Fluid regime of platinum group elements (PGE) and gold-bearing reef formation in the Dovyren mafic-ultramafic layered complex, eastern Siberia, Russia / E.G. Konnikov, W.P. Meurer, S.S. Neruchev, E.M. Prasolov, E.V. Kislov, D.A. Orsoev // Miner. Deposita. – 2000. – V. 35. – P. 526–532.
 25. The Dovyren intrusive complex (northern Baikal region, Russia): isotope-geochemical markers of contamination of parental magmas and extreme enrichment of the source / A.A. Ariskin, L.V. Danyushevsky, E.G. Konnikov, R. Maas, Yu A. Kostitsyn, A. McNeill, S., Meffre G.S. Nikolaev, E.V. / Kislov / Russian Geology and Geophysics. – 2015. – V. 56. – № 3. – P. 526–532.
 26. Благороднометалльная минерализация малосульфидного оруденения в Йоко-Довыренском расслоенном массиве (Северное Прибайкалье) / Д.А. Орсов, Н.С. Рудашевский, Ю.Л. Крецер, Э.Г. Конников // Доклады академии наук. – 2003. – Т. 390. – № 2. – С. 233–237.
 27. Глазунов О.М., Золотина М.А., Мехоношин А.С. Геохимия и рудоносность базит-гипербазитовых серий Байкало-Витимского региона // Докембрийские троговые структуры Байкало-Амурского региона и их металлогения. – Новосибирск: Наука, 1985. – С. 85–89.
 28. Цыганков А.А. Петрология, контактовые процессы и оруденение Чайского гипербазит-базитового массива (Северное Прибайкалье): автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. – Улан-Удэ, 1991. – 22 с.

Поступила 09.06.2016 г.

Информация об авторах

Юричев А.Н., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры петрографии геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDC 552.321.5:553.08

ORE MINERALIZATION FROM GABBROIDES OF ARGYSUKSKY MASSIF (NORTHWEST OF EASTERN SAYAN)

Alexey N. Yurichev,

juratur@sibmail.com

National Research Tomsk State University,
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the work is caused by the need of detailed petrological studies of numerous potentially mineralized mafic-ultramafic massifs of the Kan block of the Eastern Sayan to improve the correlation of regional schemes, and to identify Pt-Cu-Ni mineralization in them.

The main aim of the research is to study ore specialization of the rocks from Argysuksky massif in order to prove the validity of the previously made assumption on the essential similarity of Talazhinsky and Argysuksky massifs and their possible inclusion in common formational type, as well as to assess the degree of potential prospects of penetration rock for detecting commercial copper-nickel mineralization in it.

The methods used in the work: study of ore mineralization in polished sections using a polarizing microscope AxioScope Carl Zeiss; determination of chemical composition of ore mineralization by the method of X-ray spectrum microanalysis using scanning electron microscope Tescan Vega II LMU, equipped with energy-dispersive spectrometry (with a semiconductor Si (Li) detector INCA x-sight) INCA Energy 450 and wave-dispersive spectrometer INCA Wave 700.

The results. For the first time the authors identified and diagnosed ore minerals and their material composition in gabbros from Argysuksky massif; separated them into two groups of minerals (magnetite-spinelide-ilmenite and sulphide) and made an assumption on the genetic nature of these minerals. The studied mineralization has high similarity of their specialization, mineral composition and chemistry to mineralization from gabbros of Talazhinsky massif, that confirms the assumption made before on the high similarity of these objects and their assignment to a single formation type. Typomorphic and chemical features of sulphides indicate the fact that their crystallization in gabbros occurred from the original high-iron sulfide melt at high sulfur fugacity and significant role of copper in ore system. The results obtained, along with petrological features, point out the great potential of the array under study for detection of Cu-Ni mineralization.

Key words:

Argysuksky massif, gabbroides, ore mineralization, chemistry, sulfides, potentially ore-bearing.

REFERENCES

1. Agafonov L.V., Lkhamsuren J., Kuzhuget K.S., Oydup Ch.K. *Platinonosnost ultramafit-mafitov Mongolii i Tuvy* [Ultramafic-mafic PGE of Mongolia and Tuva]. Ulaanbaatar, Mongolian University of Science and Technology, 2005. 224 p.
2. Podlipsky M.Y., Tolstykh N.D., Vishnevskiy A.V., Polyakov G.V., Mekhonoshin A.S. Mineralogy and geochemistry of the Tartai massif, East Siberian metallogenic province. *Geology of Ore Deposits*, 2015, vol. 57, no. 3, pp. 172–196.
3. Ernst R.E. *Large igneous province*. Cambridge, Cambridge University Press, 2014. 654 p.
4. Tolstykh N., Krivenko A., Sidirov E., Laajoki K., Podlipsky M. Ore mineralogy of PGM placer in Siberia and the Russian Far East. *Ore Geol. Rev.*, 2002, vol. 20, pp. 1–25.
5. Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V. Mantle plumes of Central Asia (northeast Asia) and their role in forming endogenous deposits. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 2, pp. 120–143.
6. Yurichev A.N. Idarsky ultramafic complex of the Eastern Sayan: petrogeochemical features and issues of ore-bearing. *Otechestvennaya geologiya*, 2014, no. 6, pp. 56–66. In Rus.
7. Pirajno F., Santosh M. Rifting, intraplate magmatism, mineral systems and mantle dynamics in Central-East Eurasia: An overview. *Ore Geol. Rev.*, 2014, vol. 63, pp. 265–295.
8. Polyakov G.V., Tolstykh N.D., Izokh A.E., Podlipskii M.Y., Mekhonoshin A.S., Kolotilina T.B., Orsoev D.A. Ultramafic-mafic igneous complexes of the Precambrian East Siberian metallogenic province (southern framing of the Siberian craton): age, composition, origin, and ore potential. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 11, pp. 1319–1331.
9. Cherkasova T.Yu., Mazurov A.K., Chernyshov A.I. Potential ore-bearing of layered mafic-ultramafic massifs of the Nizhnederbinsky complex (NW East Sayan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 317, no. 1, pp. 20–27. In Rus.
10. Lehmann J., Arndt N., Windley B., Zhou M.-F., Wang C.Y., Harris C. Field Relationships and Geochemical Constraints on the Emplacement of the Jinchuan Intrusion and its Ni-Cu-PGE Sulfide Deposit, Gansu, China. *Econ. Geol.*, 2007, vol. 102, pp. 75–94.
11. *Platinonosnost ultrabazit-bazitovykh kompleksov Yuga Sibiri* [PGE of mafic-ultramafic complexes of South Siberia]. Eds. V.I. Bognibova, A.P. Krivenko, A.E. Izokh. Novosibirsk, Publishing House of SB RAS, Branch «Geo», 1995. 151 p.
12. Kornev T.Ya., Ekhanin A.G., Knyazev V.N., Sharifulin S.K. *Zelenokamennye poyasa yugo-zapadnogo obramleniya Sibirskoy platformy i ikh metallogeniya* [Greenstone belts of southwestern framing of the Siberian platform and their metallogeny]. Krasnoyarsk, KNIIGiMS Press, 2004. 176 p.
13. Yurichev A.N. Mafit-ultramafitovy magmatizm Kanskoy glyby i ego rudny potentsial, Severo-Zapad Vostochnogo Sayana [Mafic-ultramafic magmatism of Kansk block and its ore potential, NW Eastern Sayan]. *Rudy i metally*, 2013, no. 3, pp. 11–20.
14. Yurichev A.N., Chernyshov A.I. Talazhinsky and Argysuksky massifs: petrologo-geochemistry common traits (Northwest of Eastern Sayan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 1, pp. 40–49.
15. Yashchuk V.I. *Magmaticheskie komplekсы zony Manskogo razloma (Vostochny Sayan)*. Dis. Kand. nauk [Magmatic complexes of Mansky fault zone (Eastern Sayan)]. Cand. Diss.]. Kansk, 1975. 124 p.
16. Reed S.J.B. *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*. N.Y., Cambridge University Press, 2005. 189 p.

17. Pavlov N.V. Khimichesky sostav khromshpinelidov v svyazi s petrograficheskim sostavom porod ultraosnovnykh intruzivov [Chemical composition of chromspinelides in connection with the petrographic composition of the rocks of ultramafic intrusive]. *Trudy Geologicheskogo instituta RAN*, 1949, vol. 103, no. 3, 91 p.
18. Ramdor P. *Rudnye mineraly i ikh srastaniya* [Ore minerals and their intergrowth]. Moscow, Inostrannaya Literatura Publ., 1962. 1132 p.
19. Yurichev A.N. *Geologo-geneticheskaya model obrazovaniya i potentsialnaya rudonosnost mafit-ultramafitovykh massivov talzhinskogo i kulibinskogo kompleksov Vostochnogo Sayana*. Avtoref. Dis. Kand. nauk [Geologo-genetic model of formation and potentially mineralisation of mafic-ultramafic massifs of talzhinsky and kulibinsky complexes of Eastern Sayan. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2011. 22 p.
20. Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Konnikov A.E. The Talzhin plagioclone-troctolite-anorthosite-gabbro massif (East Sayan): petrogeochemistry and ore potential. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 2, pp. 166–180.
21. Naldrett A.J. *Magmatic sulfide deposits: geology, geochemistry and exploration*. Berlin, Springer, 2004. 727 p.
22. Kislov V.E. Rifeyskaya platinometalno-medno-nikelevaya metallogenicheskaya epokha: faktory rudoobrazovaniya [Riphean PGM-copper-nickel metallogenic epoch: factors of mineralization]. *Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov* [Petrology of igneous and metamorphic complexes]. Tomsk, TSNTI, 2009. pp. 328–338.
23. Kislov V.E., Konnikov E.G. Rifeyskaya epokha platinometalno-medno-nikelevogo rudoobrazovaniya [Riphean era of PGE-copper-nickel mineralization]. *Problemy geologii i geokhimii yuga Sibiri* [Problems of Geology and Geochemistry of southern Siberia]. Tomsk, Tomsk State University Press, 2000. pp. 67–72.
24. Konnikov E.G., Meurer W.P., Neruchev S.S., Prasolov E.M., Kislov E.V., Orsoev D.A. Fluid regime of platinum group elements (PGE) and gold-bearing reef formation in the Dovyren mafic-ultramafic layered complex, eastern Siberia, Russia. *Miner. Deposita*, 2000, vol. 35, pp. 526–532.
25. Ariskin A.A., Danyushevsky L.V., Konnikov E.G., Maas R., Kostitsyn Yu A., McNeill A., Meffre S., Nikolaev G.S., Kislov E.V. The Dovyren intrusive complex (northern Baikal region, Russia): isotope-geochemical markers of contamination of parental magmas and extreme enrichment of the source. *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, no. 3, pp. 526–532.
26. Orsoev D.A., Rudashevsky N.S., Kretser Yu.L., Konnikov E.G. Blagorodnometalnaya mineralizatsiya malosulfidnogo orudneniya v Yoko-Dovyrenskom rassloennom massive (Severnoe Pribaykale) [Precious metal mineralization in low-sulfide ores of the Ioko-Dovyren layered massif, northern Baikal region]. *Doklady Akademii Nauk*, 2003, vol. 390, no. 2, pp. 233–237.
27. Glazunov O.M., Zolotina M.A., Mekhonoshin A.S. Geokhimiya i rudonosnost bazit-giperbazitovykh seriy Baykalo-Vitimskogo regiona [Geochemistry and ore-bearing of mafic-ultramafic series of the Baikal-Vitim region]. *Dokembriyskie trogovye struktury Baykalo-Amurskogo regiona i ikh metallogeniya* [Precambrian trough structure of the Baikal-Amur region and their metallogeny]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. pp. 85–89.
28. Tsygankov A.A. *Petrologiya, kontaktovye protsessy i orudnenie Chayskogo giperbazit-bazitovogo massiva (Severnoe Pribaykale)*. Avtoref. Dis. Kand. Nauk [Petrology, contact processes and mineralization of Chaysky ultramafic-mafic massif (Northern Baikal). Cand. Diss. Abstract]. Ulan-Ude, 1991. 22 p.

Received: 09 June 2016.

Information about the authors

Alexey N. Yurichev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk State University.

УДК 621.311.001

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ НА РЕЖИМЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЬГИНСКОГО ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО КОМБИНАТА

Андреев Михаил Владимирович¹,
andreevmv@tpu.ru

Боровиков Юрий Сергеевич¹,
borovikov@tpu.ru

Гусев Александр Сергеевич¹,
gusev_as@tpu.ru

Рубан Николай Юрьевич¹,
rubanny@tpu.ru

Сулайманов Алмаз Омурзакович¹,
sao@tpu.ru

Суворов Алексей Александрович¹,
suvorovaa@tpu.ru

Уфа Руслан Александрович¹,
hecn@tpu.ru

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

Актуальность работы заключается в необходимости разработки новых методов и средств повышения энергоэффективности промышленных предприятий.

Цель работы: создание на базе Всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС) платформы для разработки и испытаний методов и средств оптимизации режимов работы, а также повышения энергоэффективности Эльгинского горнодобывающего комбината в рамках пилотного проекта по созданию интеллектуальной электроэнергетической системы России – проекта «Эльгауголь».

Методы исследования. Решение поставленных задач обусловило необходимость применения широкого спектра теоретических и экспериментальных методов и способов исследования: теории линейных и нелинейных электрических цепей с сосредоточенными и распределенными параметрами, теории автоматического регулирования и управления, теории точности и чувствительности вычислительных устройств, теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений, непрерывного неявного методически точного интегрирования дифференциальных уравнений, схемотехники на интегральных микросхемах, IT-технологий, технологий FACTS и пр.

Результаты. Для решения поставленной в работе проблемы на базе ВМК РВ ЭЭС создана уникальная тестовая платформа, позволяющая провести всережимное исследование системы электроснабжения Эльгинского горнодобывающего комбината. Кроме того, в ВМК РВ ЭЭС интегрирована модель системы автоматического управления (САУ) управляемыми шунтирующими реакторами (УШР). Проведено значительное количество исследований, фрагменты которых представлены в данной статье. Удалось выявить существенное влияние УШР под контролем САУ и разрабатываемой в рамках проекта «Эльгауголь» адаптивной автоматической системы оптимального управления и регулирования напряжения и реактивной мощности (ААСОУ) на режимы работы системы электроснабжения Эльгинского горнодобывающего комбината. В частности, выявлено, что при увеличении мощности нагрузки в энергосистеме и, как следствие, значительном снижении напряжения на шинах ряда подстанций в районе комбината, данная система позволяет предотвращать останов электродвигателей, приводящих в движение различного рода насосы, вентиляторы и другое оборудование Эльгинского горнодобывающего комбината. Кроме того, удалось выявить значительное влияние УШР на динамическую устойчивость энергосистемы, а также на повышение энергоэффективности за счет снижения потерь по активной и реактивной мощностям. Полученные результаты моделирования стали основой для реальных проектных решений в рамках проекта «Эльгауголь».

Ключевые слова:

Математическое моделирование, проект «Эльгауголь», энергоэффективность, гибридное моделирование, управляемый шунтирующий реактор.

Энергоэффективность любого крупного производства, в особенности ключевых для российской экономики добывающих производств (горнодобывающие, нефтегазодобывающие), зависит от расходуемой на него электроэнергии, значимую часть

которой составляют потери, а также от бесперебойности и качества электроснабжения, особенно основного технологического оборудования, работу которого обеспечивает множество асинхронных и синхронных двигателей, образующих главную и

значительную, причем сугубо динамическую, электрическую нагрузку в системах электроснабжения (ЭС) промышленных энергорайонов.

Все обозначенные аспекты энергоэффективности взаимосвязаны, при этом, ввиду значительной энергоемкости ряда производств, их взаимовлияние с распределительной и магистральной сетями настолько велико, что требуется детальное планирование электрических режимов потребителя, учитывающее влияние их на питающую сеть с целью достижения максимальной энергоэффективности.

Зачастую возникает ситуация, когда режимы по напряжению и перетокам реактивной мощности, обеспечивающие минимум потерь, могут оказаться неприемлемыми по условиям устойчивости узлов нагрузки или при пусках и самозапусках электродвигателей. Вместе с тем возможно обеспечение и этих режимов при использовании современных быстродействующих устройств регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности, в том числе на базе силовой полупроводниковой электроники, являющихся основой гибких систем передачи переменного тока (Flexible Alternating Current Transmission Systems – FACTS) [1–12], например управляемых шунтирующих реакторов (УШР), статических тиристорных компенсаторов (СТК), статических компенсаторов (СТАТКОМ). Однако при этом необходимо определять наиболее эффективные места установки этих устройств и алгоритмы динамического автономного и системного (в рамках ЭЭС) управления ими.

Очевидно, что для решения данной задачи, обеспечивающего максимальную энергоэффективность, в том числе за счет минимизации потерь, необходим соответствующий инструмент для эффективного и достоверного планирования режимов, учитывающий взаимосвязь всех элементов сети и существующий режим работы. Основой для создания такого инструмента являются разработанная в ТПУ технология гибридного моделирования [13–16] электроэнергетических систем и созданный на её основе Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС).

ВМК РВ ЭЭС представляет собой специализированную многопроцессорную программно-техническую систему, реализованную на базе интегральной микроэлектроники, микропроцессорной техники и IT-технологий (рис. 1).

Основные принципы построения данного комплекса:

- 1) ВМК РВ ЭЭС объединяет в себе адаптируемую совокупность специализированных гибридных процессоров (СП) всех элементов моделируемой схемы ЭЭС и информационно-управляющую систему (ИУС);
- 2) все СП строятся по единому принципу, согласно которому каждый из них содержит соответствующий решаемой системе уравнений, опре-

деляемой типом оборудования, сопроцессор (СП), в общем случае составной, и унифицированную периферию, включающую программно-аппаратный интерфейс локальной компьютерной сети, продольные и поперечные цифроуправляемые пофазные коммутаторы;

- 3) все СП в СПП также строятся по единому принципу, в соответствии с которым каждый из них представляет собой работающую под управлением микропроцессора (-ов) параллельную цифроаналоговую структуру, обеспечивающую:
 - а) непрерывное и методически точное решение в реальном времени и на неограниченном интервале системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы в силовом оборудовании ЭЭС: энергоблоках, трансформаторах, линиях электропередачи и др.;
 - б) преобразование формы представления информации: цифроаналоговое, аналого-цифровое, математическое аналоговое, трёхфазное модельное физическое;
 - в) автоматизированное и автоматическое управление параметрами, настройками, продольными и поперечными коммутациями фаз и др.;
 - г) моделирование релейной защиты и автоматики (РЗА), систем управления отдельных видов оборудования и ЭЭС в целом;
- 4) трёхфазные входы/выходы различных СПП через коммутатор трёхфазных узлов (КТУ) объединяются согласно моделируемой схеме ЭЭС, а информационный обмен микропроцессоров всех СПП с серверной ЭВМ осуществляется по локальной сети;
- 5) на серверной ЭВМ устанавливается специализированное программное обеспечение (СПО) ВМК РВ ЭЭС, в котором создаются базы данных, разнообразный программный инструментарий и в среде которого реализуются все информационно-управляющие возможности комплекса;
- 6) сервер ВМК РВ ЭЭС может быть подключен к корпоративной сети, в которой размещены клиентские компьютеры и на которых может быть установлено СПО клиента ВМК РВ ЭЭС, в том числе с регламентированными и защищёнными уровнями доступа к информационно-управляющим возможностям, текущим и архивным данным;
- 7) заложенные в ВМК РВ ЭЭС принципы построения исключают методическую ошибку в решении математических моделей элементов и, соответственно, совокупной модели ЭЭС в целом безотносительно к дифференциальному порядку, жёсткости и интервалу решения. Поэтому точность решения гарантирована и определяется только инструментальной погрешностью аппаратной части комплекса, минимизация которой обеспечивается применением прецизионных интегральных компонентов;

8) необходимый, современный и перспективный уровень метрологических и эксплуатационно-технических характеристик, технической эстетики и эргономики ВМК РВ ЭЭС обеспечивается соответствующими схмотехническими и программно-информационными решениями, ориентированными исключительно на применение новейших достижений интегральной цифровой и аналоговой микроэлектроники, компьютерной техники и программно-информационных технологий.

Таким образом, ВМК РВ ЭЭС, в отличие от существующих средств, полностью исключает необходимость декомпозиции режимов и процессов в оборудовании и ЭЭС и позволяет осуществлять непрерывное, устойчивое и достоверное мо-

делирование в реальном времени и на неограниченном интервале совокупности процессов, протекающих в силовом оборудовании, электрических сетях и ЭЭС в целом, с учетом функционирования средств релейной защиты, технологической и противоаварийной автоматики (ПА), включая процессы в измерительных трансформаторах, при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы.

Для решения выше обозначенной проблемы авторами проведены исследования в рамках пилотного проекта ОАО «ФСК ЕЭС» по созданию интеллектуальной энергосистемы на базе энергокластера «Эльгауголь» [17–20], входящего в состав объединенной энергосистемы (ОЭС) Востока (рис. 2). Одними из основных элементов в силовой части

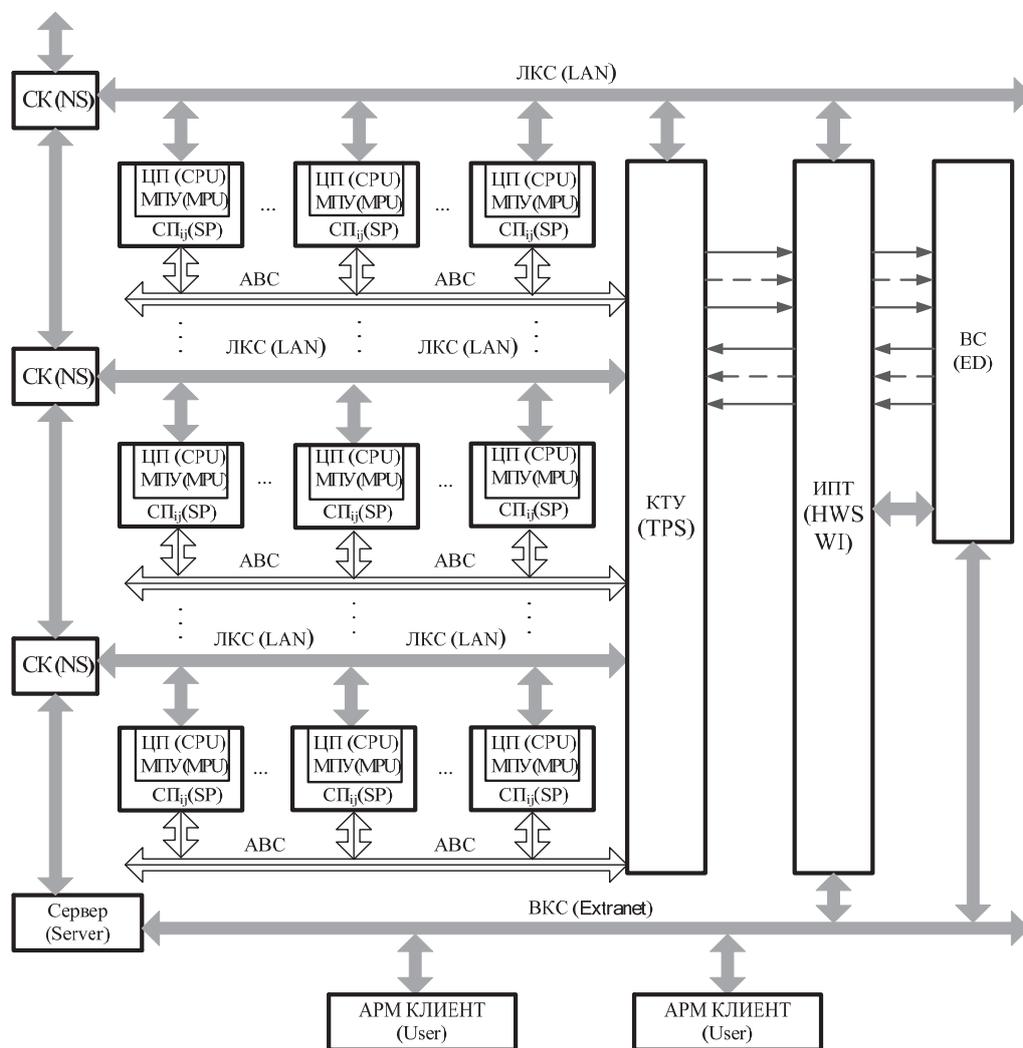


Рис. 1. Структура ВМК РВ ЭЭС: ЦП – центральный процессор; СП – специализированный процессор; CK – сетевой коммутатор; ЛКС – локальная компьютерная сеть; ВКС – внешняя компьютерная сеть; ABC – трехфазные входы/выходы СП; КТУ – коммутатор трехфазных узлов; ИПТ – программно-технический интерфейс; BC – внешние средства; МПУ – микропроцессорный узел

Fig. 1. Structure of HRTSim: TPS is the three-phase switch; HWSWI is the hardware and software interface; SP is the specialized processor; CPU is the central processing unit; MPU is the microprocessor unit; LAN is the local area network; NS are the network switches; ED is the external device; ABC are the physical three-phase inputs-outputs

энергодоклада являются управляемые шунтирующие реакторы (УШР): УШР-25000/110, РТУ-100000/220-УХЛ1. Реактор мощностью 100 МВАр планируется установить на подстанции (ПС) «Призейская», от которой осуществляется электроснабжение энергодоклада, а два реактора по 25 МВАр – на ПС «Эльгауголь».

Локальное управление УШР осуществляется системой автоматического управления (САУ). Основные функции данной системы:

- стабилизация напряжения в точке подключения;
- управление током реактора;
- управление степенью загрузки УШР по реактивной мощности.

Система снабжена гистерезисным регулятором, которым при загрузке УШР по реактивной мощности до минимального/максимального уровня и удержании этого уровня в течение определенного времени осуществляется включение/отключение одного или поочередно нескольких блоков конденсаторных батарей (БСК). Кроме того, в состав САУ УШР входит ряд внутренних защит реактора и БСК: защита от перегрузки, от потери напряжения и перенапряжения.

Централизованное управление УШР ПС «Призейская» и «Эльгауголь» осуществляется с помощью адаптивной автоматической системы оптимального управления и регулирования напряжения и реактивной мощности (ААСОУ), которой

зависимости от режимных параметров в ЭЭС выдаются уставки в САУ соответствующих УШР. Организованное таким образом управление группой средств компенсации реактивной мощности (СКРМ) на данных подстанциях позволяет поддерживать нормативный уровень напряжения во всем энергодокладе, включающем в себя четыре подстанции и сети высокого напряжения основного потребителя – горнодобывающего комбината.

В рамках проекта «Эльгауголь» на базе ВМК РВ ЭЭС создана программно-аппаратная платформа для тестирования и настройки адаптивного регулятора ААСОУ, в частности для решения следующих задач:

- подбор рабочих диапазонов параметров регулятора ААСОУ;
- проверка достаточности мощности, количества и оптимальности мест установки, предусмотренных проектом СКРМ, для решения задач ААСОУ;
- проверка эффективности решений использования ААСОУ;
- проверка условий статической и динамической устойчивости энергодоклада и прилегающей сети;
- исследование и анализ нормальных и аварийных режимов в питающей сети, сети энергодоклада и электроустановках потребителей энергодоклада, в том числе мощной двигательной нагрузки.

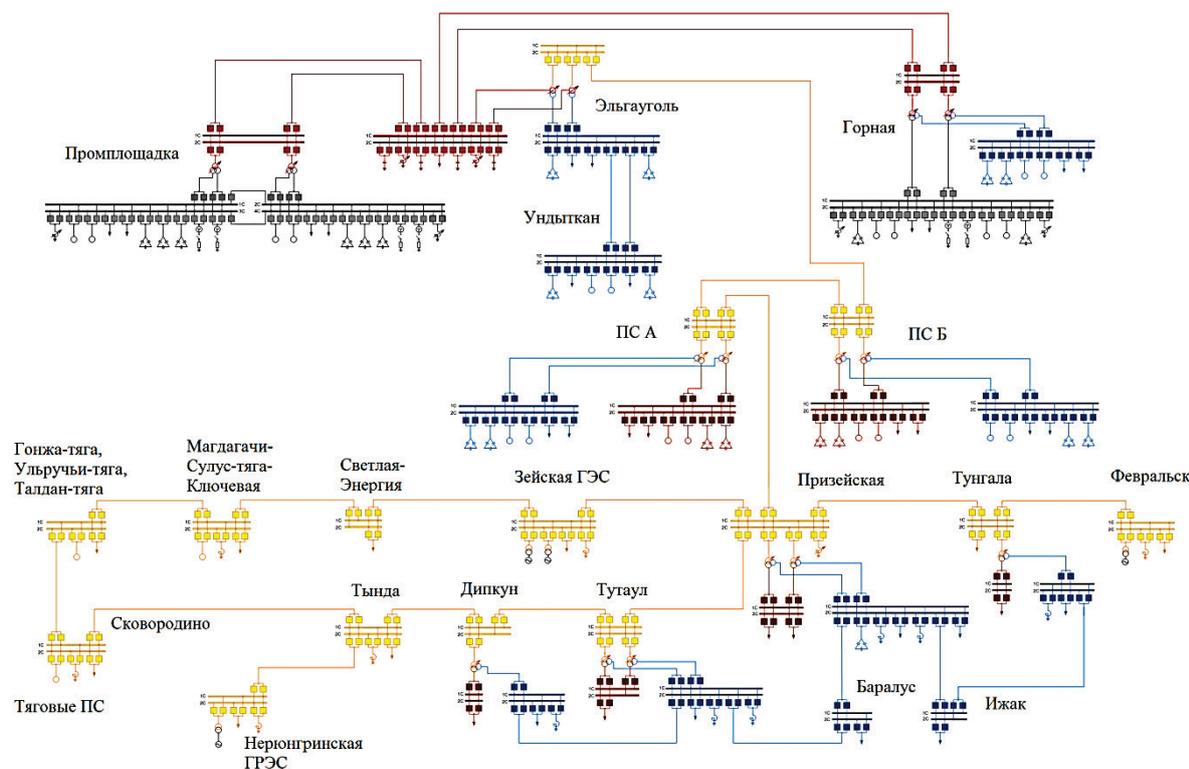


Рис. 2. Схема моделируемой энергосистемы

Fig. 2. Scheme of modeled power system

Разработанная трехфазная схема моделирования энергокластера «Эльгауголь» содержит:

- энергоблоки – 4;
- автотрансформаторы и трансформаторы – 16;
- линии электропередачи – 27;
- обобщенную нагрузку – 47;
- двигатели асинхронные и синхронные – 120;
- шунтирующие реакторы – 12;
- конденсаторные батареи – 26;
- управляемые шунтирующие реакторы – 7.

Решение поставленных задач предполагает исследование совместной работы регулятора ААСОУ и САУ УШР подстанций «Призейская» и «Эльгауголь». В связи с этим на основании анализа систем управления реакторов, установка которых планируется в энергокластере, создана и интегрирована в ВМК РВ ЭЭС модель САУ УШР.

Ниже представлены фрагменты результатов исследований в рамках проекта «Эльгауголь», выполненные на ВМК РВ ЭЭС (рис. 3–10).

Согласно рис. 4 при отключенных САУ УШР ПС «Эльгауголь» на этапе «сброса» нагрузки напряжение возрастает до уровня, значительно превышающего 5% -ю зону относительно заданной уставки, в отличие от эксперимента, когда данные средства включены. Другое и главное отличие этого эксперимента от представленного на рис. 3 – то, что во время набора нагрузки произошло значительное снижение напряжения, что в конечном счете привело к остановке асинхронных двигателей на ПС «Промплощадка» и ПС «Горная», питаемых от шин 110 кВ ПС «Эльгауголь». Вследствие

этого активная мощность линий, отходящих от шин 110 кВ ПС «Эльгауголь», резко уменьшилась, а реактивная мощность увеличилась. Данный тест (и ряд других тестов, не описанных здесь) подтверждает эффективность разрабатываемой системы (ААСОУ) для поддержания устойчивой работы энергокластера и прилегающей периферии.

Сравнив рис. 5 и 6, становится очевидным, что активные и реактивные потери в энергокластере при отключенных САУ УШР выше, чем при включенных. Отсюда можно сделать вывод о том, что установка САУ УШР и подобных систем повышает эффективность работы энергосистемы и уменьшает суммарные потери электроэнергии.

На рис. 7 и 8 приведены результаты экспериментов, демонстрирующие влияние САУ УШР, БСК на динамическую устойчивость энергокластера. На рис. 7 представлен график изменения нагрузки на шинах 110 кВ ПС «Эльгауголь» при включенных САУ УШР, БСК. В некоторый момент времени моделируется короткое замыкание на шинах 110 кВ ПС «Горная», которая питается по двум ЛЭП от ПС «Эльгауголь». Затем происходит срабатывание РЗ и повреждение локализуется. При этом устойчивость в энергокластере и во всей ЭЭС сохраняется, о чем свидетельствуют взаимные (угол ротора синхронной машины относительно угла ротора ведущей машины) углы δ генераторов. На рис. 7 представлены результаты аналогичного эксперимента, за исключением того, что САУ УШР, БСК отключены. Очевидно, что после короткого замыкания синхронный режим в ЭЭС нарушается.

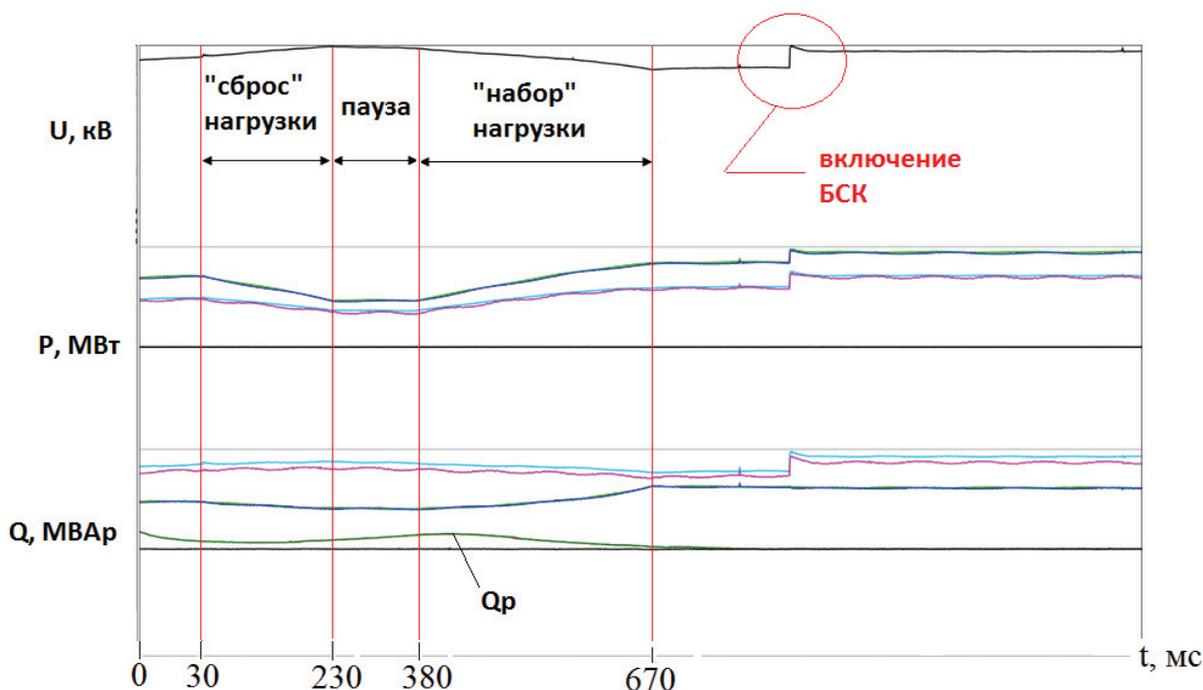


Рис. 3. График изменения нагрузки шин 110 кВ ПС «Эльгауголь» при включенных САУ УШР, БСК ПС «Эльгауголь»

Fig. 3. Real time data oscillogram of changes of power of load connected to 110kV-bus of Elgaugol substation (TCR's ACSs of Elgaugol substation are operated)

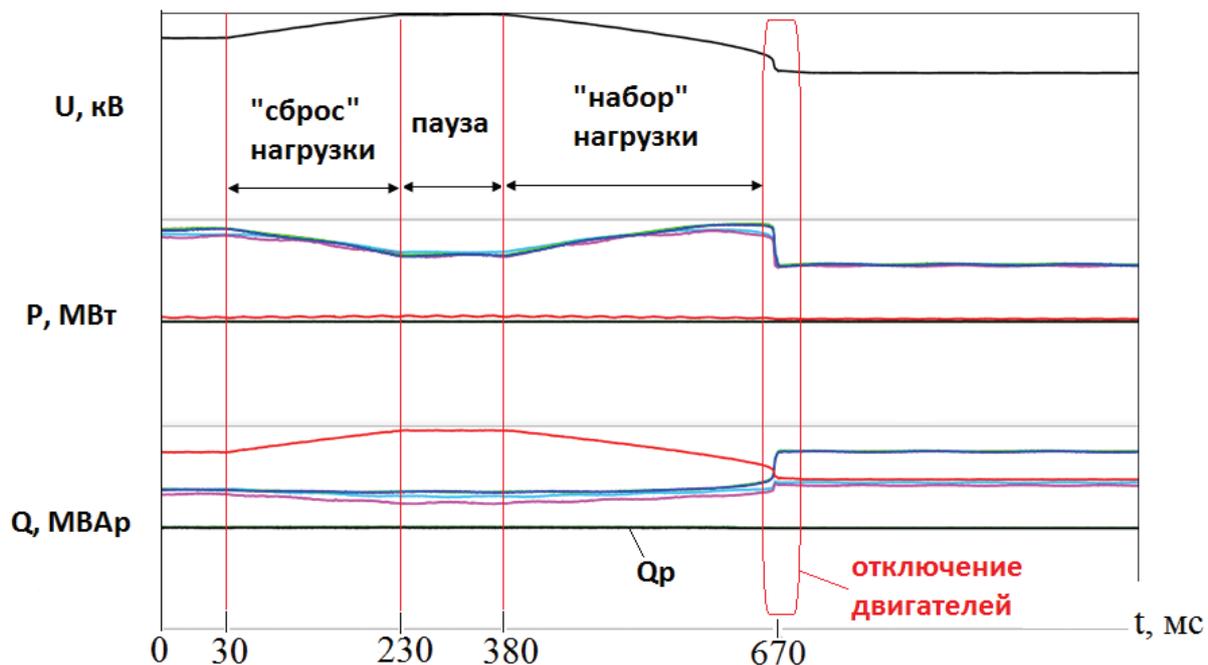


Рис. 4. График изменения нагрузки шин 110 кВ ПС «Эльгауголь» при отключенных САУ УШР, БСК ПС «Эльгауголь»

Fig. 4. Real time data oscillogram of changes of power of load connected to 110kV-bus of Elgaugol substation (TCRr's ACSs of Elgaugol substation are disabled)

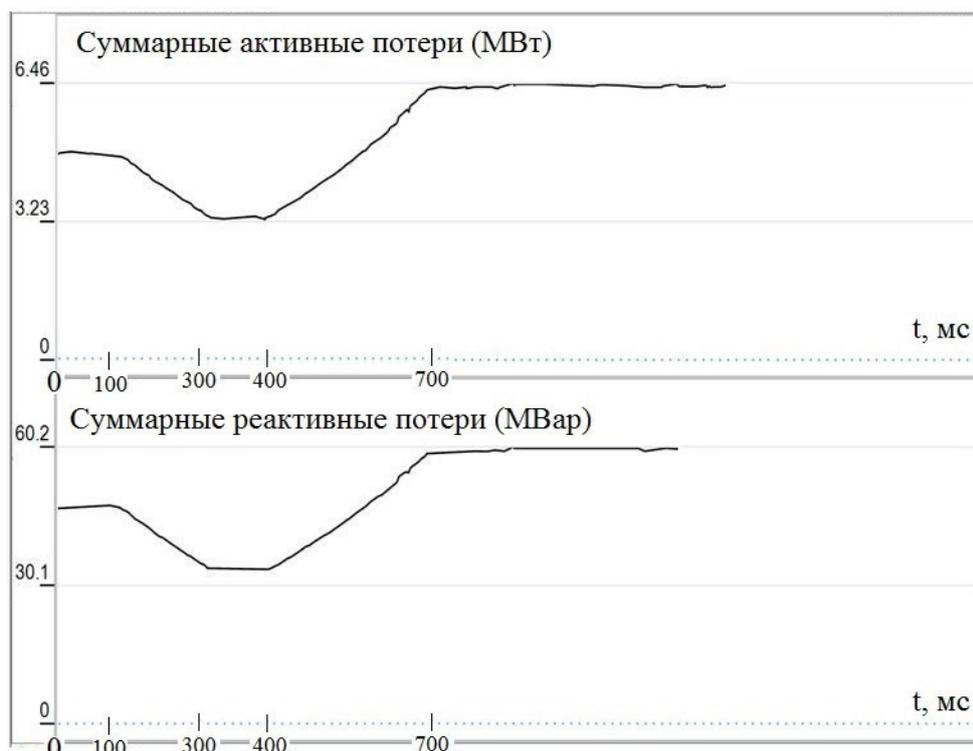


Рис. 5. Суммарные активные и реактивные потери в энергокластере при включенных САУ УШР, БСК ПС «Эльгауголь»

Fig. 5. Total active and reactive power losses in energy cluster (TCRr's ACSs of Elgaugol substation are operated)

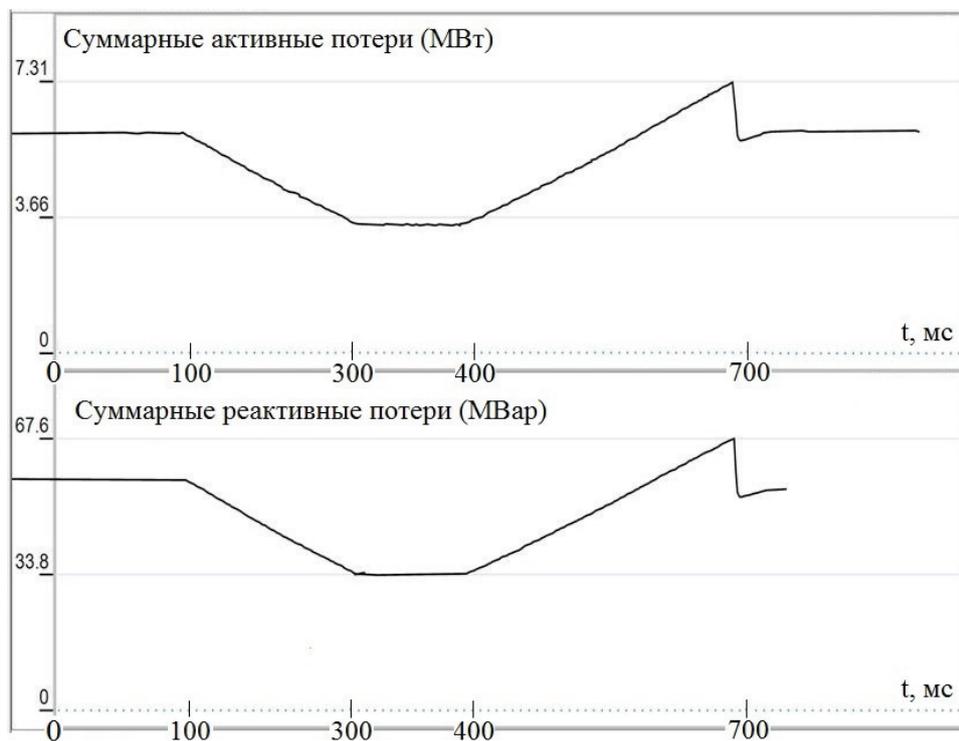


Рис. 6. Суммарные активные и реактивные потери в энергокластере при отключенных САУ УШР, БСК ПС «Эльгауголь»

Fig. 6. Total active and reactive power losses in energy cluster (TCRr's ACSs of Elgaugol substation are disabled)

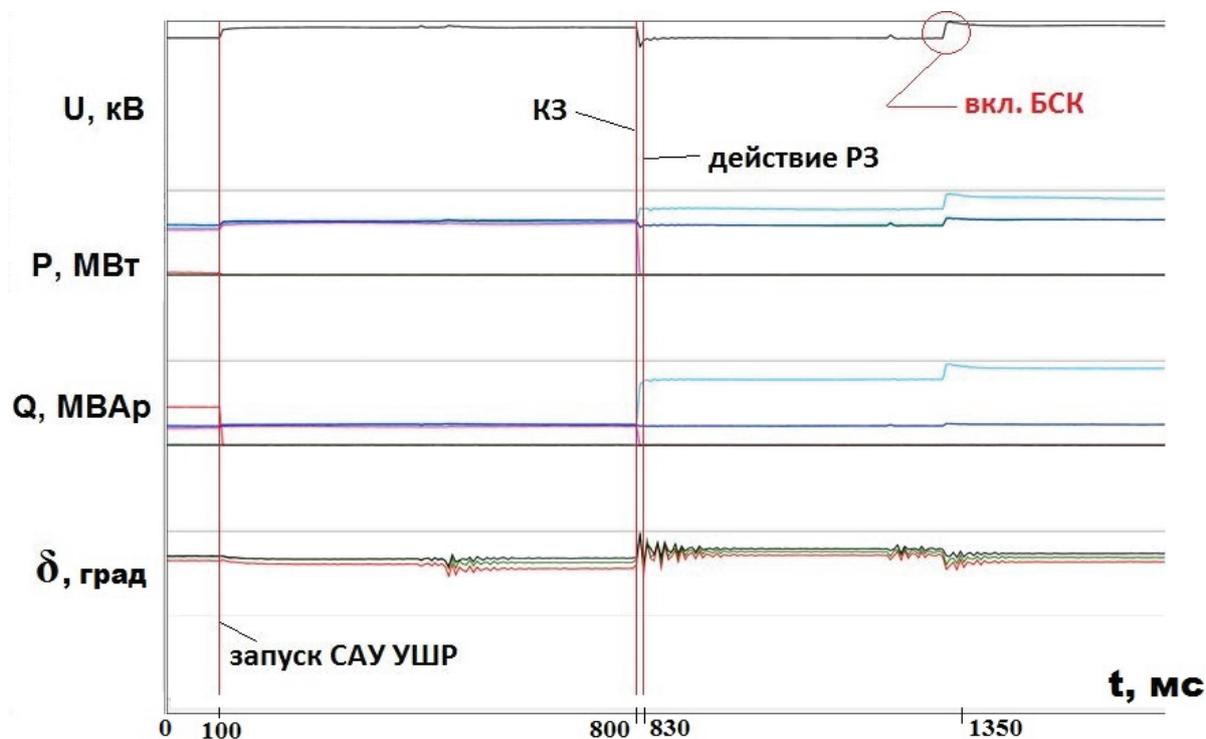


Рис. 7. Осциллограммы изменения нагрузки шин 110 кВ ПС «Эльгауголь» и взаимных углов генераторов в ЭЭС при отключении одной из питающих линий энергокластера (САУ УШР, БСК ПС «Эльгауголь» включены).

Fig. 7. Real time data oscillogram of power dissipated in the load connected to the 110-kV bus of the Elgaugol substation and mutual angles of the generators after short circuit occurrence in the 110-kV buses of the Gornaya substation (TCRr's ACSs of the Elgaugol substation operated)

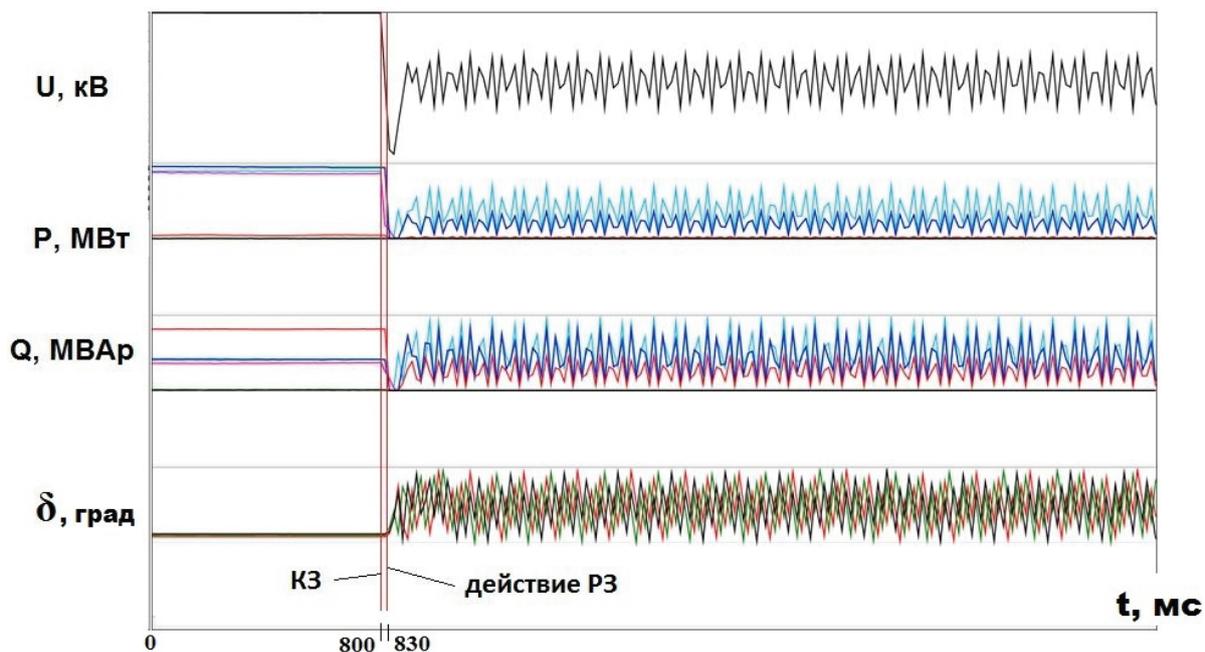


Рис. 8. Осциллограммы изменения режимных параметров нагрузки шин 110 кВ ПС «Эльгауголь» и взаимных углов генераторов в ЭЭС при КЗ на одном из присоединений (САУ УШР ПС «Эльгауголь» отключены).

Fig. 8. Real time data oscillogram of power dissipated in the load connected to the 110-kV bus of the Elgaugol substation and mutual angles of the generators after short circuit occurrence in the 110-kV buses of the Gornaya substation (TCRr's ACSs of the Elgaugol substation disabled)

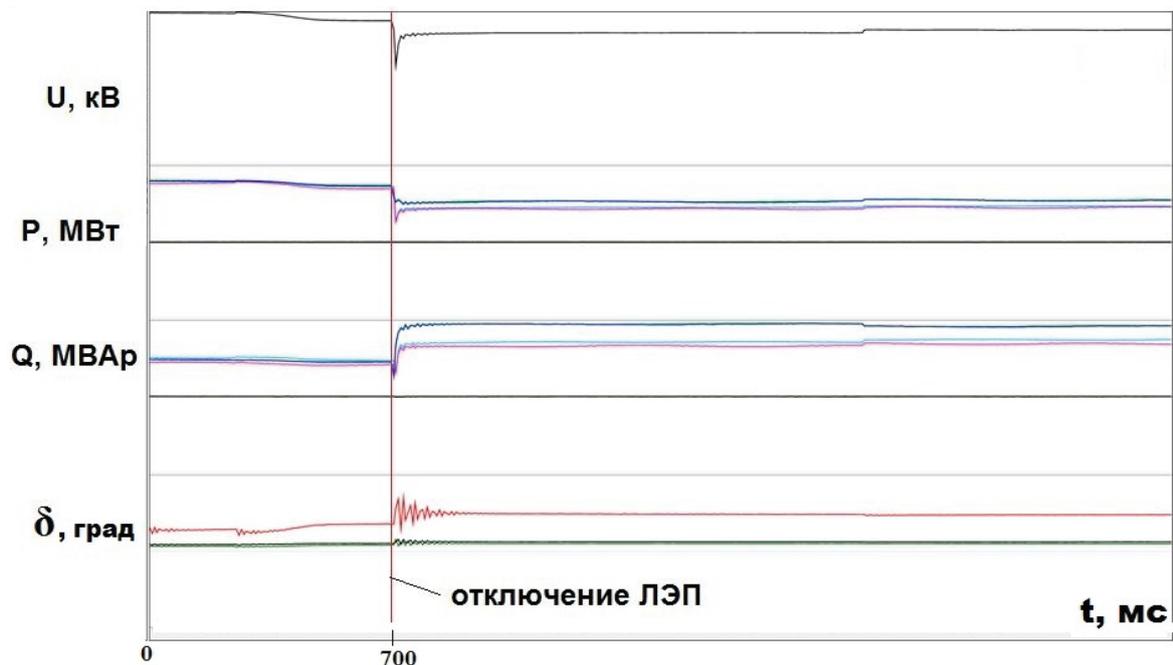


Рис. 9. Осциллограммы изменения нагрузки шин 110 кВ ПС «Эльгауголь» и взаимных углов генераторов в ЭЭС при отключении одной из питающих линий энергокластера (САУ УШР, БСК ПС «Эльгауголь» включены).

Fig. 9. Real time data oscillogram of power dissipated in the load connected to the 110-kV bus of the Elgaugol substation and mutual angles of the generators after disconnection of a power line supplying the energy cluster (TCRr's ACSs of the Elgaugol substation operated)

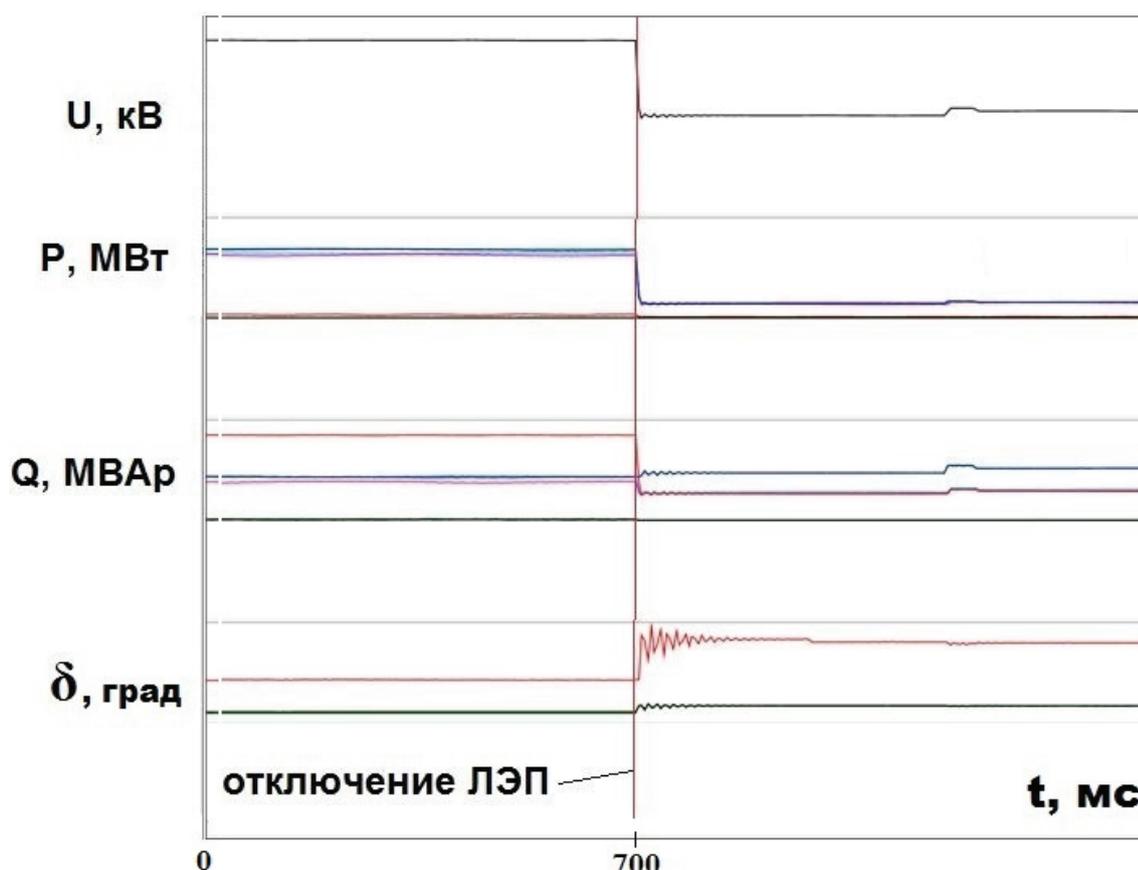


Рис. 10. Осциллограммы изменения нагрузки шин 110 кВ ПС «Эльгауголь» и взаимных углов генераторов в ЭЭС при отключении одной из питающих линий энергокластера (САУ УШР, БСК ПС «Эльгауголь» отключены)

Fig. 10. Real time data oscillogram of power dissipated in the load connected to the 110-kV bus of the Elgaugol substation and mutual angles of the generators after disconnection of a power line supplying the energy cluster (TCR's ACSs of the Elgaugol substation disabled)

На рис. 9 и 10 представлены результаты эксперимента по оценке динамической устойчивости энергокластера и ЭЭС в целом при отключении одной из ЛЭП 220 кВ ПС «Призейская» – ПС А, питающей энергокластер.

Результаты экспериментов при включенных (рис. 9) и отключенных (рис. 10) САУ УШР, БСК показали, что динамическая устойчивость ЭЭС может быть сохранена в обоих случаях, однако при заблокированных устройствах FACTS отключение обозначенной выше линии приводит к резкому снижению напряжения и останову двигателей ПС «Промплощадка» и ПС «Горная», питающихся от ПС «Эльгауголь».

Объем данной статьи не позволяет вместить результаты большого количества тестов, проводимых в рамках проекта. Можно лишь сказать, что все они подтвердили эффективность группы УШР и БСК под управлением ААСОУ, а также позволили сформировать оптимальные параметры и на-

стройки программно реализованного регулятора ААСОУ.

Исследования, проведенные в рамках проекта «Эльгауголь», в том числе и представленные в данной работе, подтверждают возможность эффективного использования ВМК РВ ЭЭС как платформы для решения задач разработки, проектирования, исследования и управления СЭС и ЭЭС. Характеристики и свойства комплекса, приобретенные вследствие уникальной программно-технической архитектуры, кратко описанной в начале данной статьи, определяют превосходство ВМК РВ ЭЭС над аналоговыми и гибридными устройствами моделирования прошлых лет.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Госзадание «Наука» № 2.1655.2016 от 01.01.2016, тема: «Разработка и исследование гибридной модели вставки несинхронной связи электроэнергетических систем».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Multiple FACTS devices integration through distributed control system and its application on the GCC interconnection / T. Masood, S.A. Qureshi, R.K. Aggarwal, D.P. Kothari // 7th IEEE GCC Conference and Exhibition (GCC). – Doha, 2013. – P. 64–69.
2. Nazarloo A., Hosseini S.H., Babaei E. Flexible D-STATCOM Performance as a Flexible Distributed Generation in Mitigating Faults // 2nd power electronics drive systems and technologies conference. – Tehran, 2011. – P. 568–573.
3. Ghahremani E., Kamwa I. Optimal placement of multiple-type FACTS devices to maximize power system loadability using a generic graphical user interface // IEEE Transactions on Power Systems – 2013. – V. 28. – Iss. 2. – P. 764–778.
4. Hingorani N. Flexible AC transmission // IEEE Spectrum. – 1993. – V. 30. – № 4. – P. 40–45.
5. Rahimzadeh S., Tavakoli M., Viki A. Simultaneous application of multi-type FACTS devices to the restructured environment // IET Gener. Transm. Distrib. – 2009. – V. 4. – № 3. – P. 349–362.
6. Gerbex S., Cherkaoui R., Germond A.J. Optimal placement of multi-type FACTS devices in a power system by means of genetic algorithms // IEEE Trans. Power Syst. – 2001. – V. 16. – № 3. – P. 537–544.
7. Mohammadzadeh Niaki A.H., Dabaghian Amiri I. The impact of shunt-FACTS devices on distance relay performance // 2nd International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI). – Tehran, 2015. – P. 348–354.
8. Singh A.R., Patne N.R., Kale V.S. Adaptive distance protection setting in presence of mid-point STATCOM using synchronized measurement // Electrical Power and Energy Systems. – 2015. – V. 67. – P. 252–260.
9. Обзор существующих решений по алгоритмам управления статическим компенсатором реактивной мощности типа СТАТКОМ / Е.А. Кукарекин, Ю.О. Соловьёва, А.О. Лаптев, К.В. Хацевский // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность! – 2015. – № 1. – С. 217–221.
10. Ненахов А.И. Перспективы использования устройств компенсации типа СТАТКОМ в сетях промышленных предприятий // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2015. – № 10. – С. 30–36.
11. Шакарян Ю.Г., Фокин В.К., Лихачев А.П. О влиянии быстрого действия управляемых шунтирующих реакторов трансформаторного типа на стабилизацию напряжения и электромеханические переходные процессы // Электричество. – 2015. – № 5. – С. 4–14.
12. Долгополов А.Г. Этапы развития управляемых шунтирующих реакторов для электрических сетей высокого и сверхвысокого напряжения // Энергетик. – 2013. – № 6. – С. 55–60.
13. Всережимное моделирование в реальном времени перенапряжений в электроэнергетических системах / Ю.С. Боровиков, А.С. Гусев, А.О. Сулайманов, М.В. Андреев // Автоматизация в промышленности. – 2014. – № 7. – С. 17–21.
14. Полигон для отработки решений по построению активно-адаптивных сетей на базе всережимного моделирующего комплекса реального времени / Ю.С. Боровиков, А.С. Гусев, М.В. Андреев, Р.А. Уфа // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – № 4. – С. 292–296.
15. Андреев М.В., Боровиков Ю.С. Оптимизация уставок дифференциальных защит трансформаторов и автотрансформаторов с помощью их адекватных математических моделей // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3. – С. 53–61.
16. Сулайманов А.О., Андреев М.В., Рубан Н.Ю. Концепция адекватного моделирования релейной защиты и противоаварийной автоматики энергосистем // Электричество. – 2012. – № 6. – С. 17–20.
17. Дорофеев И.Н., Летуновский Д.Н., Маргулян А.М. Пилотный проект активно-адаптивной сети кластера «Эльгауголь» – задачи создания и основные технические решения // Релейная защита и автоматизация. – 2011. – № 3. – С. 70–77.
18. Волошин Е.А., Волошин А.А. Опыт разработки и задачи перспективного развития систем автоматического управления средствами компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения // Энергетик. – 2013. – № 6. – С. 41–43.
19. Шеметова В.Г. Оценка эффективности освоения Эльгинского месторождения // Регион: Экономика и Социология. – 2011. – № 4. – С. 200–210.
20. Янченко А.С., Козлов А.Н. Разработка идеологии и структуры цифровой подстанции для энергокластера «Эльгауголь» // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2014. – № 67. – С. 80–84.

Поступила 20.06.2016 г.

Информация об авторах

Андреев М.В., кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетических систем Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Боровиков Ю.С., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетических систем Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Гусев А.С., доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электроэнергетических систем Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Рубан Н.Ю., кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электроэнергетических систем Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Сулайманов А.О., кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроэнергетических систем Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Суворов А.А., ассистент кафедры электроэнергетических систем Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Уфа Р.А., ассистент кафедры электроэнергетических систем Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.311.001

STUDY OF INFLUENCE OF THYRISTOR CONTROLLED REACTORS ON THE REGIMES OF POWER SUPPLY SYSTEMS OF ELGA COAL MINING COMPLEX

Mikhail V. Andreev¹,
andreevmv@tpu.ru

Yury S. Borovikov¹,
borovikov@tpu.ru

Alexander S. Gusev¹,
gusev_as@tpu.ru

Nikolay Y. Ruban¹,
rubanny@tpu.ru

Almaz O. Sulaymanov¹,
sao@tpu.ru

Aleksey A. Suvorov¹,
suvorovaa@tpu.ru

Ruslan A. Ufa¹,
hecn@tpu.ru

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

The relevance of the discussed issue is caused by the need to develop new methods and means of improving the energy efficiency of industrial enterprises.

The main aim of the study is to create on the basis of Hybrid Real-Time Power System Simulator (HRTSim) a platform for developing and testing methods and tools for optimization of operating regimes, as well as energy efficiency of Elga coal mining complex in the framework of the pilot project on the creation of intelligent electric power system of Russia – the project «Elgaugol».

The methods used in the study. Solution of the tasks determined the necessity to use a wide range of theoretical and experimental methods and techniques of research: the theory of linear and non-linear electrical circuits with lumped and distributed parameters, automatic control and control theory, the theory of precision and sensitivity of computing devices, sampling methods of the theory of ordinary differential equations, continuous implicit methodically precise integration of differential equations, the circuitry on integrated circuits, IT-technologies, FACTS technologies etc.

The results. To solve the problem of the research the unique test platform based on the HRTSim was developed. The platform allows all-regimes studying of power supply system of the Elga mining enterprise. In addition, the model of the automatic control system (ACS) of thyristor controlled reactors (TCR) is integrated into the HRTSim. A considerable amount of researches has been carried out. The fragments of these researches are introduced in the paper. It was possible to identify a significant impact of TCR under the control of ACS and developed within the project «Elgaugol» active-adaptive voltage and var control system (AAVVCS) in the operating regimes of power supply system of the Elga coal mining complex. In particular, it was found that at incensement of loads in power system and, as a consequence, a significant reduction of voltages on the bus-bars of a number of substations in the area of the mining enterprise, the developed system prevents the stop of motors driving the various kinds of pumps, fans and other equipment of the Elga coal mining complex. In addition, it was possible to identify a significant impact of TCRs on the dynamic stability of power system, as well as energy efficiency by reducing the losses of active and reactive power. These simulation results were the basis for the actual design solutions within the framework of the project «Elgaugol».

Key words:

Mathematical simulation, project «Elgaugol», energy efficiency, hybrid simulation, thyristor controlled reactor.

The research was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, State Task «Nauka» no 2.1655.2016, 01.01.2016, subject: «Development and research of a hybrid model of asynchronous tie insert in power systems».

REFERENCES

1. Masood T., Qureshi S.A., Aggarwal R.K., Kothari D.P. Multiple FACTS devices integration through distributed control system and its application on the GCC interconnection. *7th IEEE GCC Conference and Exhibition (GCC)*. Doha, 2013, pp. 64–69.
2. Nazarloo A., Hosseini S.H., Babaei E. Flexible D-STATCOM Performance as a Flexible Distributed Generation in Mitigating Faults. *2nd power electronics drive systems and technologies conference*. Tehran, 2011. pp. 568 – 573.
3. Ghahremani E., Kamwa I. Optimal placement of multiple-type FACTS devices to maximize power system loadability using a gen-

- eric graphical user interface. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, vol. 28, no. 2, pp. 764–778.
4. Hingorani N. Flexible AC transmission. *IEEE Spectrum*, 1993, vol. 30, no. 4, pp. 40–45.
 5. Rahimzadeh S., Tavakoli M., Viki A. Simultaneous application of multi-type FACTS devices to the restructured environment. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2009, vol. 4, no. 3, pp. 349–362.
 6. Gerbex S., Cherkaoui R., Germond A.J. Optimal placement of multi-type FACTS devices in a power system by means of genetic algorithms. *IEEE Trans. Power Syst.*, 2001, vol. 16, no. 3, pp. 537–544.
 7. Mohammadzadeh Niaki A.H., Dabaghian Amiri I. The impact of shunt-FACTS devices on distance relay performance. *2nd International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI)*. Tehran, 2015. pp. 348–354.
 8. Singh A.R., Patne N.R., Kale V.S. Adaptive distance protection setting in presence of mid-point STATCOM using synchronized measurement. *Electrical Power and Energy Systems*, 2015, vol. 67, pp. 252–260.
 9. Kukarekin E.A., Solovov Yu.O., Laptev A.O., Khatsevsky K.V. Obzor sushchestvuyushchikh resheniy po algoritmam upravleniya staticheskimi kompensatorom reaktivnoy moschnosti tipa STATKOM [Review of existing solutions on algorithms for controlling STATCOM type static var compensator]. *Rossiya molodaya: pereodnyye tekhnologii – v promyshlennost!*, 2015, no. 1, pp. 217–221.
 10. Nenakhov A.I. Perspektivy ispolzovaniya ustroystv kompensatsii tipa STATKOM v setyah promyshlennykh predpriyatiy [Prospects of using the devices such as STATCOM compensation in industrial networks]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*, 2015, no. 10, pp. 30–36.
 11. Shakaryan Yu.G., Fokin V.K., Likhachev A.P. Effect of speed of the controlled shunt reactor of transformer type on stabilization of voltage and electromechanical transients. *Electricity*, 2015, no. 5, pp. 4–14. In Rus.
 12. Dolgoplov A.G. Stages of development of controlled shunt reactors for electrical networks of high voltage and extra high voltage. *Energetik*, 2013, no. 6, pp. 55–60. In Rus.
 13. Borovikov Yu.S., Gusev A.S., Sulaymanov A.O., Andreev M.V. Vserezhimnoe modelirovanie v realnom vremeni perenapryazheniy v elektroenergeticheskikh sistemah [All-regimes real-time simulation of surge in electric power systems]. *Automation in industry*, 2014, no. 7, pp. 17–21.
 14. Borovikov Yu.S., Gusev A.S., Andreev M.V., Ufa R.A. Poligon dlya otrabotki resheniy po postroeniyu aktivno-adaptivnykh setey na baze vserezhimnogo modeliruyushchego kompleksa realnogo vremeni [Testbed based on hybrid real-time power system simulator for research and development of active-adaptive networks]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka*, 2014, no. 4, pp. 292–296.
 15. Andreev M.V., Borovikov Yu.S. Optimization of transformers differential protection settings with its adequate mathematical models. *Modern problems of science and education*, 2013, no. 3, pp. 53–61.
 16. Sulaymanov A.O., Andreev M.V., Ruban N.Yu. Concept of adequate modeling of relay protection and emergency automation of power systems. *Electricity*, 2012, no. 6, pp. 17–20. In Rus.
 17. Dorofeev I.N., Letunovskiy D.N., Margulyan A.M. Pilotnyy projekt aktivno-adaptivnoy seti klastera «Elgaugol» – zadachi sozdaniya i osnovnye tekhnicheskie resheniya [Pilot project of active-adaptive grid of «Elgaugol» cluster – the tasks of creating and main technical solutions]. *Relay protection and automation*, 2011, no. 3, pp. 70–77.
 18. Voloshin E.A., Voloshin A.A. Experience in development and problems of perspective development of automatic control systems by means of reactive power compensation and voltage regulation. *Energetik*, 2013, no. 6, pp. 41–43. In Rus.
 19. Shemetova V.G. Evaluating the effectiveness of the development of the Elga reserve. *Region: Economics and Sociology*, 2011, no. 4, pp. 200–210. In Rus.
 20. Yanchenko A.S., Kozlov A.N. Razrabotka ideologii i struktury tsifrovoy podstantsii dlya energoklastera «Elgaugol» [Development of the ideology and structure of digital substation for power cluster «Elgaugol»]. *Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennyye i ekonomicheskie nauki*, 2014, no. 67, pp. 80–84.

Received: 20 June 2016.

Information about the authors

Mikhail V. Andreev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Yury S. Borovikov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander S. Gusev, Dr. Sc., associate professor, professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Nikolay Y. Ruban, Cand. Sc., senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Almaz O. Sulaymanov, Cand. Sc., associate professor, head of the department, National Research Tomsk Polytechnic University.

Aleksey A. Suvorov, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Ruslan A. Ufa, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 537.523.3

УСТАНОВКА ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ПОИСКА СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ В ТОНКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ МЕТОДОМ КОРОННОГО РАЗРЯДА

Лавринович Валерий Александрович¹,
lavrhome@mail.ru

Меженский Алексей Анатольевич¹,
alexey.mejenskiy@gmail.com

Рахимов Рафаэль Самматович¹,
rafael555rakhimov@yandex.ru

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

Актуальность темы обусловлена необходимостью диагностики и профилактики состояния изоляции электрических машин горнодобывающей и нефтяной отрасли, в которых важны надежность и безопасность эксплуатации электрооборудования. Диагностика скрытых дефектов позволяет прогнозировать остаточный ресурс работы электрической изоляции, планировать профилактические испытания и своевременные ремонты электротехнического оборудования высокого и низкого напряжений.

Цель исследования: разработка установки, позволяющей бесконтактно обнаруживать в тонких диэлектрических пленках различные дефекты, такие как сквозные отверстия, воздушные включения, проводящие включения, уменьшение толщины тонких диэлектрических покрытий, нанесенных на металлическое основание, которым могут быть электрические проводники с током, печатные платы.

Методы исследования. Для получения вольт-амперных характеристик исследуемого коронного разряда на исследуемый объект подавалось постоянное напряжение разной полярности, регистрировались ток через исследуемый промежуток в диапазоне 1...100 мкА с помощью микроамперметра типа М4204 и измерение высокого напряжения на исследуемом промежутке в диапазоне 1...15 кВ с помощью электростатического киловольтметра типа С196. Визуальная картина коронного разряда фиксировалась с помощью цифрового микроскопа типа «Микрон 800».

Результаты. Показана возможность обнаружения сквозных и скрытых дефектов размером порядка 10 мкм и более путем измерения тока коронного разряда в системе электродов острие-плоскость и визуальной картины коронного разряда. Приведены экспериментальные результаты применения коронного разряда с регулируемыми параметрами тока и напряжения для обнаружения скрытых дефектов в диэлектрических покрытиях, наносимых на токоведущие металлические основания, и тонких диэлектрических пленках, применяемых в качестве изоляции в современных электрических машинах большой и малой мощности. Особенностью установки является применение нелинейного элемента для ограничения тока короткого замыкания до значений, не вызывающих повреждения диэлектрического покрытия и коронного разряда регулируемых параметров по току и напряжению в качестве диагностирующего инструмента. Установка содержит регулируемый источник постоянного напряжения (0...30 кВ), нелинейный регулируемый ограничитель тока для предотвращения короткого замыкания в случае пробоя, регистратор тока короны, фото- и видео регистрацию оптических явлений коронирования.

Ключевые слова:

Коронный разряд, ток, дефект, тонкая пленка, лакокрасочное покрытие, высокое напряжение, нелинейный элемент.

Введение

Актуальность. Для эффективной работы горнодобывающей отрасли необходимо использовать надежное электротехническое оборудование. Производительность труда в горнодобывающей отрасли прямо пропорциональна электровооруженности. Горнодобывающая отрасль относится к числу энергоемких. Установленная мощность токоприемников большинства рудников превышает 20 МВт, что сравнимо с потребляемой мощностью крупных промышленных предприятий и средних по размерам населенных пунктов [1].

При высоком уровне электровооруженности в горной промышленности одним из важнейших эксплуатационных показателей электротехнического оборудования является их эксплуатационная надежность, так как она напрямую влияет на производительность и безопасность труда. Современное горное производство требует, чтобы оборудова-

ние работало бесперебойно в течение достаточно длительного, заранее заданного межремонтного периода. Для достижения поставленной цели необходимо полностью исключить причины, вызывающие поломки всех узлов и элементов сложного горнодобывающего комплекса, составной частью которого является электрооборудование. В электрической части машин элементом, отвечающим за срок службы оборудования и его надежность, является изоляция [2].

В связи с этим актуальна задача диагностики и профилактики состояния изоляции электрических машин горнодобывающей промышленности с целью своевременного выделения скрытых дефектов и прогнозирования их остаточного ресурса. Одним из методов обнаружения скрытых дефектов изоляции электрических машин может быть применение коронного разряда, позволяющего на ранней стадии без повреждения изоляции обнаружи-

вать, например, сквозные отверстия в тонкопленочной изоляции, широко используемой в электрических машинах [3].

Объект исследования. Корона как вид самостоятельного разряда известна более ста лет, тем не менее до настоящего времени к этому явлению обращаются и исследователи, и технологи [3–10]. Это явление представляет интерес не только с научной точки зрения, но и как инструмент для многих технологических целей, например для электрофильтров [5], электростатической окраски [6] и др. Одним из направлений использования коронного разряда может быть обнаружение скрытых дефектов в тонких пленках или лакокрасочных покрытиях металлических конструкций. Существуют установки, которые позволяют находить дефекты покрытия так называемым искровым методом, однако у них есть существенный недостаток – это искра, которая во многих случаях недопустима и может вывести из строя, например, радиоэлектронную схему, покрытую тонким слоем защитного лака. Различные методы, которые пытаются применить в этой области, исключающие повреждение радиоэлектронной аппаратуры, не имеют достаточной разрешающей способности по месторасположению дефекта и ограничены по возможности обнаружения отверстий размером менее 0,3 мм [8, 9].

В источниках [8–11] приводятся данные о нахождении несплошности диэлектрических покрытий и их моделировании, нанесенных на металлическую подложку с помощью коронного разряда, переходящего в искровой разряд. Существенный недостаток описанного в [9–13] метода заключается в том, что коронирующий электрод соприкасается с диагностируемой диэлектрической поверхностью и в случае приближения к несплошности покрытия происходит искровой пробой между коронирующим электродом и заземленной металлической подложкой. Возникающий при этом ток разряда приводит к разрушению диэлектрического покрытия и вызывает эрозию металлической подложки.

Для отдельных видов оборудования, например для радиоэлектронной техники, такие воздействия могут приводить к выходу из строя элементов этого оборудования, поэтому в этой отрасли поиск дефектов в лаковых покрытиях не проводится. Например, дефектоскоп «Корона 2.2» [14] позволяет выявлять несплошности диэлектрических покрытий за счет искрового пробоя между электродом-щупом и металлической подложкой.

Таким образом, к недостаткам электроискрового метода можно отнести:

- 1) контакт щупа с поверхностью тестируемого диэлектрического покрытия;
- 2) регистрация дефекта по факту пробоя;
- 3) невозможность обнаружения латентных дефектов без разрушения покрытия;

4) напряжение на щупе от 20 кВ и выше;

5) большие токи в случае пробоя – от сотен микроампер до единиц миллиампер.

Использование искрового метода и установок, основанных на этом принципе, неприемлемо для тонких пленок и печатных плат, изоляционных покрытий обмоток двигателей и трансформаторов.

Дефекты, которые могут встречаться в тонких диэлектрических покрытиях, представлены на рис. 1. дефекты, за исключением первого, являются латентными, и их выявление представляется нетривиальной задачей.

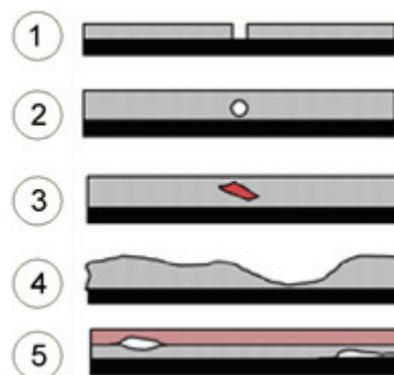


Рис. 1. Виды дефектов: 1 – сквозные дефекты; 2 – газовые включения; 3 – твердотельные включения инородных материалов, которыми могут быть диэлектрики с большим значением диэлектрической проницаемости, чем диэлектрическое покрытие, или металлические включения (например, металлическая стружка); 4 – зоны с уменьшенной толщиной покрытия; 5 – отслоение и расслоение

Fig. 1. Types of defects: 1 are the holes; 2 are the gas inclusions, 3 are the solid inclusions (dielectrics with high dielectric constant or metal inclusion); 4 are the thin dielectric zones; 5 are the layer separation and stratification

Применение коронного разряда в качестве диагностического инструмента, по нашему мнению, позволит исключить контакт щупа с диэлектрической поверхностью, искровой пробой, обнаружить латентные дефекты, снизить до единиц киловольт напряжение на электроде-щупе, а также токи, протекающие в цепи при диагностировании, до нескольких микроампер. Важно отметить, что диэлектрическое покрытие может выступать в качестве барьера при наличии латентных дефектов типа газовое включение и расслоение, это может быть использовано для разработки метода их обнаружения путем регистрации импульсного тока еще до появления чехла короны [15].

В связи с этим нами была поставлена задача: создать установку для бесконтактного и бездефектного обнаружения скрытых дефектов в тонких диэлектрических пленках, нанесенных на металлическое основание, посредством коронного разряда с регулируемыми параметрами тока и напряжения.

Описание установки

Структурная схема экспериментальной установки, созданной для поиска дефектов в лаковых и пленочных покрытиях, представлена на рис. 2.

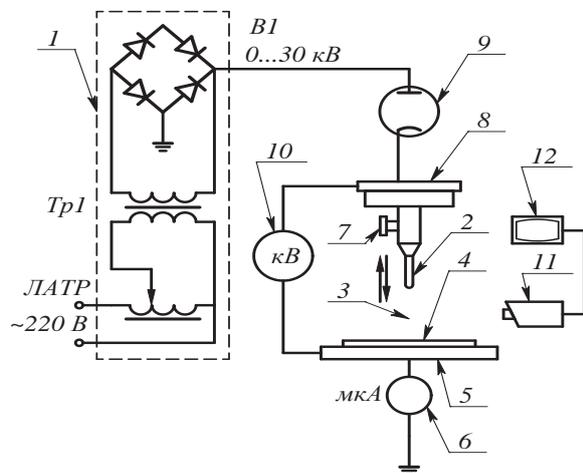


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – высоковольтный блок; 2 – острие (коронирующий электрод); 3 – воздушный промежуток; 4 – диэлектрическое покрытие (или диэлектрическая пленка); 5 – заземленная металлическая подложка; 6 – микроамперметр; 7 – цанговый зажим; 8 – микрометрический винт; 9 – нелинейный элемент (кенотрон); 10 – электростатический киловольтметр С196; 11 – цифровой микроскоп типа «Микрон 800»; 12 – персональный компьютер

Fig. 2. Block diagram of the test bench: 1 is the high-voltage block; 2 is the needle electrode (corona electrode); 3 is the air gap; 4 is the dielectric covering (or dielectric film); 5 is the grounded metal substrate; 6 is the microammeter; 7 is the collet clip; 8 is the micrometric screw; 9 is the nonlinear element (vacuum rectifying tube); 10 is the electrostatic C196 kilovoltmeter; 11 is the digital microscope like «Micron 800»; 12 is the personal computer

Основным элементом установки является высоковольтный блок 1 постоянного регулируемого напряжения в системе «острие 2 – воздушный промежуток 3 – диэлектрическое покрытие (или диэлектрическая пленка) 4 – заземленная металлическая подложка 5». Для получения короны на острие используется источник высокого напряжения с плавной регулировкой в пределах 0...30 кВ. Регистрация тока короны осуществлялась с помощью электромагнитного микроамперметра 6 типа М4204, класс точности 1,5. Для крепления острия (коронирующего электрода) применялся цанговый зажим 7, который вмонтирован в устройство с микрометрическим винтом 8, позволяющим регулировать расстояние между коронирующим острием и заземленной металлической подложкой в пределах 1...15 мм с точностью $\pm 0,1$ мм. Цанговый зажим позволяет зажимать коронирующие электроды диаметром 0,1...2,0 мм. Измерение расстояния между металлической подложкой и кончиком коронирующего электрода (проводник 2) контроли-

руется следующим способом. Первоначально определяется расстояние между кончиком коронирующего электрода и заземленной металлической подложкой с помощью катетометра типа КМ-6, который позволяет определять расстояние с точностью до 0,01 мм. Затем в процессе экспериментов расстояние определялось по лимбу на микрометрическом винте с погрешностью 0,1 мм, что при расстоянии более 3 мм между коронирующим электродом и металлической подложкой обеспечивало погрешность в определении расстояния не более 3%. Для ограничения тока короткого замыкания, которое возможно в процессе экспериментов, в установке предусмотрен нелинейный элемент (9), который выполнен на базе кенотрона типа 1Ц21П. Измерение напряжения между коронирующим электродом и заземленной металлической подложкой осуществляется посредством электростатического киловольтметра 10 типа С196 (класс точности 1,0), что позволяет свести к минимуму влияние измерительного прибора на процессы коронирования.

Оптическая визуализация явлений в промежутке при коронном разряде осуществляется посредством цифрового микроскопа (11) типа «Микрон 800» и персонального компьютера (12).

Для регулирования напряжения на коронирующем электроде использовались ЛАТР-1, повышающий Тр1, выпрямительный мост В1 (на базе диодов Д1008).

Предварительные эксперименты по определению сквозных дефектов в тонких диэлектрических пленках показали, что при пробое в промежутке между острым электродом и металлической подложкой происходит повреждение диагностируемой пленки и изменение кончика острейного электрода токами короткого замыкания [16]. Чтобы исключить эти повреждения, которые могут вывести из строя элементы радиоэлектронной аппаратуры, в разрядный контур был введен нелинейный элемент (кенотрон типа 1Ц21П) [17]. Регулируя накал кенотрона, можно было менять предельный ток лампы, ограничивая тем самым ток короткого замыкания при пробое между электродом и металлической подложкой в случае искрового пробоя между ними. Вольтамперные характеристики лампы 1Ц21П в зависимости от тока накала приведены на рис. 3. В процессе экспериментов ток накала 1Ц21П можно выбирать таким, чтобы в случае пробоя между электродами (рис. 2) не происходило разрушения диагностируемого диэлектрического покрытия и радиоэлектронной аппаратуры, защищаемой диэлектрическим покрытием.

Система электродов в данной установке образована иглой и плоскостью. Игла обладает большой кривизной поверхности, это приводит к резкой неоднородности поля, что позволяет значительно снизить требуемое напряжение зажигания коронного разряда. Как результат снижается вероятность повреждения поверхности покрытия и подложки [18].

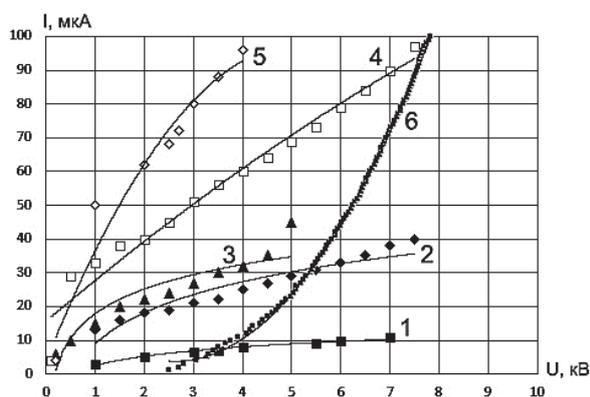


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики 1Ц21П для разных значений тока накала кенотрона: 1 – 0,42; 2 – 0,43; 3 – 0,44; 4 – 0,445; 5 – 0,45 А. 6 – вольт-амперная характеристика электродной системы острие–плоскость при расстоянии между электродами 6 мм и токе накала 0,445 А (диаметр острия 0,18 мм)

Fig. 3. Current-voltage characteristics 1Ts21P for different values of vacuum rectifying tube heater current: 1 – 0,42; 2 – 0,43; 3 – 0,44; 4 – 0,445; 5 – 0,45 A. 6 is the volt-ampere characteristic of the needle electrode–plane electrode system at 6 mm distance between the electrodes and heater current of 0,445 A (edge diameter is 0,18 mm)

Для измерения напряжения на коронирующем электроде использовался электростатический киловольтметр типа С196, что исключало его влияние на процессы в коронном разряде и позволяло снимать вольт-амперные характеристики.

В связи с тем, что коронный разряд можно наблюдать визуально и, соответственно, получать дополнительную информацию, в установке предусмотрена видеосъёмка световых явлений в процессе получения вольт-амперных характеристик с помощью ПК и цифрового микроскопа типа «Микрон 800» (рис. 2), позволяющего получать увеличенные изображения на персональном компьютере. С помощью этого же микроскопа получены изображения дефектов после их обнаружения (рис. 4, б).

Искровой пробой, возникающий в межэлектродном промежутке, может приводить к повреждению диагностируемого диэлектрика. В первых экспериментах использовали пассивное ограничение тока короткого замыкания при пробое посредством высоковольтного защитного резистора типа КЭВ-5, включенного последовательно в контур. Предполагалось, что использование резистора позволит избежать повреждений диагностируемого диэлектрического покрытия или диэлектрической пленки при пробое между острым электродом и подложкой (рис. 2). Эксперименты показали, что при больших значениях сопротивления защитного резистора (более 10^6 Ом), когда не происходит разрушение пленки, коронный разряд не загорается и скачком переходит в искровой. В результате невозможно получить вольт-амперную характеристику коронного разряда. А при значениях сопротивления защитного резистора менее 10^4 Ом токи короткого замыкания значительно разрушали диагностируемый диэлектрик. Причина разрушительного воздействия – искровой разряд. Канал разряда деформирует стенки отверстия и способен прожечь материал по микротрещине от сквозного отверстия до латентного дефекта [18].

На рис. 4, а представлена фотография искрового пробоя в цепи с ограничительным защитным резистором сопротивлением 150 кОм. Вид пробоя идентичен пробую, происходящему при обнаружении несплошности диэлектрических покрытий с помощью дефектоскопа «Корона 2.2». На рис. 4, б представлена картина последствий этого искрового пробоя, полученная с помощью микроскопа «Микрон 800». Видно, что возникший искровой пробой приводит к повреждению диагностируемого материала, следовательно, делает его не пригодным для дальнейшего применения в конденсаторостроении.

Также при применении резистора в качестве ограничительного элемента необходимы большие значения прикладываемого напряжения – это оказывает влияние на свойства применяемых пленок,

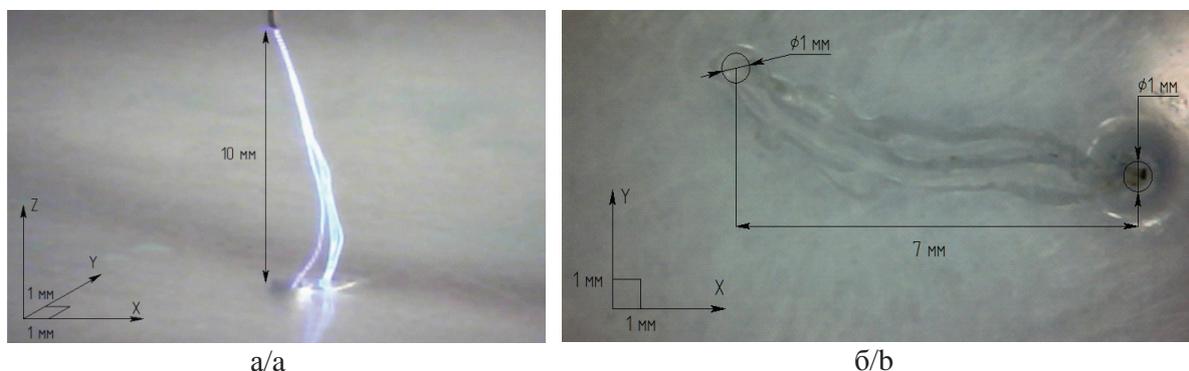


Рис. 4. Вид искрового разряда и его последствий: а – искровой разряд; б – след на поверхности диагностируемой пленки после искрового пробоя при ограничении тока защитным резистором

Fig. 4. Type of the spark discharge and its consequences: a is the spark discharge; b is the trace on the surface of the studied film after the spark at current limit by the protective resistor

что вызовет ухудшение их диэлектрических свойств и сокращение сроков эксплуатации [19].

В качестве альтернативы был опробован способ ограничения тока коронного разряда за счет использования кенотрона. Кенотрон эмиссией электронов с катода ограничивал ток, который можно было регулировать за счет накала нити катода. До достижения пробивного напряжения между электродами 2 и 5 (рис. 2) ток в цепи определяется характеристиками коронного разряда, но не может превысить значение, определяемое пропускной способностью кенотрона за счет эмиссии электронов с катода. При отсутствии пробоя кенотрон фактически не ограничивает ток короны. Таким образом, удается снять вольт-амперную характеристику коронного разряда.

Используя спроектированную установку, ведутся исследования возможности обнаружения различного вида дефектов покрытий и тонких пленок. В качестве примера на рис. 5 приведена вольт-амперная характеристика системы электродов «острие (электрод 2) – плоскость (электрод 5)» (рис. 2) без диэлектрического покрытия.

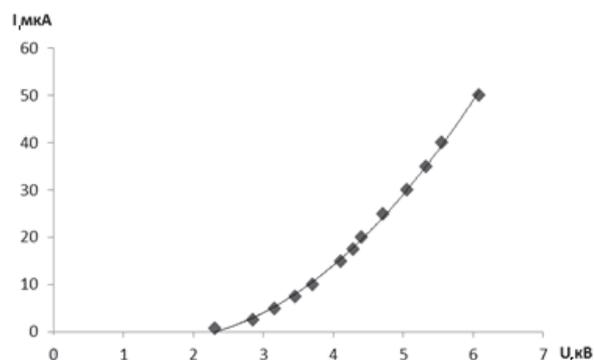


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика системы острие–плоскость: диаметр острия 0,18 мм; расстояние между острием и плоскостью 6 мм; атмосферное давление 764 мм рт. ст.; температура окружающего воздуха 20 °С; ток накала кенотрона 0,445 А.

Fig. 5. Current-voltage characteristic of the needle electrode-plane system: the needle electrode diameter is 0,18 mm; distance between the needle electrode and the plane is 6 mm; atmospheric pressure is 764 mm Hg; ambient air temperature is 20 °C; vacuum rectifying tube heated current is 0,445 A

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жмуровский Д.И. Влияние энергооборуженности горно-шахтного оборудования на эффективность и надежность производственных процессов в шахте // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 1. – С. 59–62.
2. Шевчук В.П. Исследования повышения надежности работы переменного тока электрических машин в алмазной добывающей промышленности // Труды VIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – С. 103–104.
3. Ямансарин И.И. Исследование эксплуатационной надежности асинхронных двигателей в условиях горно-обогатительного

Условия эксперимента: температура окружающего воздуха в лаборатории 23 °С, давление воздуха 760 мм рт. ст. Влажность в данной работе не учитывалась, так как ее влияние не приводило к изменению тока короны [20, 21]. Измерения проводились по следующей методике: напряжение подавалось с шагом 0,3 кВ до появления минимального тока, который фиксировался микроамперметром (рис. 2). Напряжение, при котором появлялся ток, считали начальным напряжением короны. Появление короны всегда связано с появлением свечения у острия. В случае диагностирования пленок без дефектов ток короны равен нулю до искрового пробоя. В случае диагностирования пленок со сквозными дефектами напряжение появления короны совпадало с напряжением появления короны в системе острие–плоскость без диэлектрического покрытия. При диагностировании диэлектрических пленок со сквозным дефектом всегда наблюдалось свечение вблизи острейного электрода и в месте сквозного дефекта [22–25]. С помощью цифрового микроскопа типа «Микрон-800» место дефекта определяется с высокой точностью.

Результаты

Разработана экспериментальная установка для снятия вольт-амперных характеристик коронного разряда на постоянном напряжении в диапазоне 0...30 кВ. Для ограничения тока короткого замыкания в случае пробоя использован кенотрон типа 1Ц21П, который выступает как нелинейный ограничитель тока короткого замыкания в цепи коронирующего электрода. Ток короткого замыкания между острием и плоскостью можно регулировать накалом катода кенотрона и тем самым изменять в диапазоне от 10 до 90 мкА. Такой способ ограничения тока короткого замыкания позволяет снимать вольт-амперные характеристики без повреждения диагностируемой диэлектрической пленки при искровых пробоях. Установка позволяет диагностировать дефекты различного вида в тонких диэлектрических покрытиях путем снятия вольт-амперных характеристик и визуализации мест дефекта с помощью простого микроскопа типа «Микрон 800» и персонального компьютера.

комбината: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Оренбург, 2012. – 120 с.

4. Panich Intra, Nakorn Tippayawong. Comparative Study on Electrical Discharge and Operational Characteristics of Needle and Wire-Cylinder Corona Chargers // Journal of Electrical Engineering & Technology. – 2006. – V. 1. – № 4. – P. 520–527.
5. Point-to-Point Corona Discharge in Admixtures of Argon, Oxygen, and Acetylene / R. Islam, P.D. Pedrov, Shuzheg Xie, K.R. Englund // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2015. – V. 43. – № 10. – P. 3695–3701.
6. Influence of Gas Composition on Corona Discharge Characteristics in the High Temperature / A. Bologna, H.-R. Paur, H. Seifert, K. Woletz // International Journal of Plasma Environmental Science & Technology. – 2011. – V. 5. – № 2. – P. 110–116.

7. Electric potential distribution at the surface of insulating materials exposed to corona discharges from various electrode configurations / A. Reguig, A. Bendaoud, B. Neagoe, Y. Prawatya, L. Dascalescu // Journal of Electrostatics. – 2016. – V. 82. – № 8. – P. 55–62.
8. Lowke J.J., Morrow R. Theory of electric corona including the role of plasma chemistry // Pure & Appl. Chem – 1994. – V. 66. – № 6. – P. 1287–1294.
9. Corona based air-flow using parallel discharge electrodes / Van Thanh Dau, Thien Xuan Dinh, Tung Thanh Bui, Canh-Dung Tran, Hoa Thanh Phan, Tibor Terebessy // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2016. – V. 79. – № 12. – P. 52–56.
10. Очистка дымовых газов ТЭС с помощью электрофильтров. http://vei.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=164/ (дата обращения: 15.02.2016).
11. Артамонов О.Ф. Численное моделирование покрытия в электрическом поле // Электричество. – 2011. – № 11. – С. 46–54.
12. Матвеев А.В., Пюкке Г.А. Емкостной контроль диэлектрической проницаемости изоляционных покрытий проводников // Научные ведомости. Серия: Математика. Физика. – 2015. – № 11 (208). – Вып. 39. – С. 211–215.
13. Паспорт технического устройства: прибор для контроля и обнаружения дефектов изоляционных покрытий электроискровым методом «Корона 2.2» УАЛТ.025.000.00ПС. URL: http://www.sk-ndt.ru/files/korona_22.pdf/ (дата обращения: 15.02.2016).
14. Андрианов В.Р. Устройство для контроля сплошности диэлектрических покрытий на внутренней поверхности металлических цилиндрических изделий / Всемирная организация интеллектуальной собственности, 1990–1992. URL: <https://patentscope.wipo.int> (дата обращения: 15.02.2016).
15. Влияние барьера на форму и структуру коронного разряда в воздухе / Ю.К. Стишков, В.Б. Козлов, А.Н. Ковалев, А.В. Самусенко // Электронная обработка материалов. – 2010. – № 4. – Т. 46. – С. 315–323.
16. Некоторые особенности коронного разряда в воздухе / С.Б. Афанасьев, Д.С. Лавренюк, И.Н. Петрущенко, Ю.К. Стишков // Журнал технической физики. – 2008. – № 7. – Т. 78. – С. 848–852.
17. Высоковольтные кенотроны // Музей электронных раритетов. 2016. URL: <http://www.155la3.ru/kenotrons.htm> (дата обращения: 15.02.2016).
18. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009. – 736 с.
19. Равшанов Д.Ч. Исследование свойств поверхности полимерных пленок из ПП и ПЭ, активированных коронным разрядом // Материалы Международной научно-практической конференции «Передача, обработка, восприятие текстовой и графической информации». – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2015. – С. 135–142.
20. Александров Н.Л., Базелян Э.М., Новицкий Д.А. Влияние влажности на свойства длинных стримеров в воздухе // Журнал технической физики. – 1997. – № 9. – Т. 24. – С. 86–91.
21. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1992. – 536 с.
22. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. – М.: Изд-во Московского физико-технического института, 1997. – 320 с.
23. Development of back corona discharge in a wire-cylinder electrostatic precipitator at high temperatures / Mingjiang Ni, Xihui Wang, Gang Xiao, Kunzan Qiu, Guang Yang, Xiang Gao, Kefa Cen // Powder Technology. – 2015. – V. 286. – № 12. – P. 789–797.
24. An experimental study of relative humidity and air flow effects on positive and negative corona discharges in a corona-needle charger / Artit Yawootti, Panich Intra, Nakorn Tippayawong, Phadungsak Rattanadecho // Journal of Electrostatics. – 2015. – V. 77. – № 10. – P. 116–122.
25. Hong Luo, Xian-Deng Hou, Zhou Long. Miniaturized Corona Discharge-Atomic Emission Spectrometer for Determination of Trace Mercury // Chinese Journal of Analytical Chemistry. – 2015. – V. 43. – № 9. – Iss. 9. – P. 1291–1295.

Поступила 03.03.2016 г.

Информация об авторах

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

Меженский А.А., студент Электроэнергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Рахимов Р.С., студент Электроэнергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 537.523.3

EQUIPMENT FOR NON-CONTACT SEARCH OF HIDDEN DEFECTS IN THIN DIELECTRIC FILMS BY CORONA DISCHARGE

Valery A. Lavrinovich¹,

lavrhome@mail.ru

Alexey A. Mezhenyky¹,

alexey.mezenskiy@gmail.com

Rafael S. Rakhimov¹,

rafael555rakhimov@yandex.ru

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

Relevance of a subject is caused by the need of diagnostics and prevention of isolation condition of electrical machines in mining and oil branches, where reliability and safety of operation of electric equipment are important. Diagnostics of latent defects allows predicting a residual resource of electric isolation operation, planning preventive tests and timely repairs of electrotechnical equipment of high and low tension.

The aim of the research is to develop the installation, which allows no-contact detecting of various defects: through holes, air pockets, conducting inclusions, reduction of thickness of the thin dielectric coverings, applied on metal base which can be electric conductors with current, printed circuit boards.

Research methods. For obtaining volt-ampere characteristics of the studied corona discharge the constant voltage of different polarity was applied to the studied object, current was recorded in a certain interval in the range of 1...100 mA by means of the M4204 and high voltage was measured within the studied interval in the range of 1...15 kV by means of the electrostatic C196 kilovoltmeter. The visual picture of the corona discharge was recorded by means of «Micron 800» type digital microscope

Results. The paper demonstrates the possibility to determine the through and latent defects of about 10 microns and more measuring the corona discharge current in the needle electrode-plane electrode system and a visual picture of the corona discharge. The paper introduces the experimental results of application of the corona discharge with adjustable parameters of current and tension for determining latent defects in dielectric coverings, applied on the current carrying metal bases, and in thin dielectric films, applied as isolation in modern electrical machines of high and low power. The feature of the installation is application of nonlinear element to restrict short circuit current to the values, which do not cause the damage of a dielectric covering and the corona discharge of adjustable current and tension parameters as the diagnosing tool. The installation contains an adjustable source of constant tension (0 ... 30 kV), the nonlinear adjustable current limiter for preventing short circuit in case of breakdown, the corona current recorder, photo and video registration of optical phenomena of a corona effect.

Key words:

Corona discharge, current, defect, thin film, paint, high voltage, non-linear element.

REFERENCES

- Zhmurovsky D.I. Vliyaniye energovooruzhennosti gorno-shakhtnogo oborudovaniya na effektivnost i nadezhnost proizvodstvennykh protsessov v shakhte [Effect of available power of mining equipment on efficiency and reliability of production processes in mine]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byuliten*, 2006, no. 1, pp. 59–62.
- Shevchuk V.P. Issledovaniya povysheniya nadezhnosti raboty poremennogo toka elektricheskikh mashin v almasznoy dobyvayushchey promyshlennosti [Research of improving the reliability of the AC electric cars in diamond mining industry]. *Sovremennyye tekhnika i tekhnologii. Trudy vosmoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i mmolodykh uchenykh* [Modern engineering and technologies. Eighth International scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists]. Tomsk, April 12, 2002. pp. 103–104.
- Yamansarin I.I. *Issledovanie ekspluatatsionnoy nadezhnosti asinkhronnykh dvigateley v usloviyakh gorno-obogatitel'nogo kombinata: avtoreferat Dis. Kand. nauk* [Investigation of operational reliability of induction motors in mining and processing plant. Cand. Diss. Abstract]. Orenburg, 2012. 120 p.
- Panich Intra, Nakorn Tippayawong. Comparative Study on Electrical Discharge and Operational Characteristics of Needle and Wire-Cylinder Corona Chargers. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2006, vol. 1, no. 4, pp. 520–527.
- Rokibul Islam, Partrick D. Pedrov, Shuzheg Xie, Karl R. Englund. Point-to-Point Corona Discharge in Admixtures of Argon, Oxygen, and Acetylene. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, vol. 43, no. 10, pp. 3695–3701.
- Bologa A., Paur H.-R., Seifert H., Woletz K. Influence of Gas Composition on Corona Discharge Characteristics in the High Temperature. *International Journal of Plasma Environmental Science & Technology*, 2011, vol. 5, no. 2, pp. 110–116.
- Reguig A., Bendaoud A., Neagoe B., Prawatya Y., Dascalescu L. Electric potential distribution at the surface of insulating materials exposed to corona discharges from various electrode configurations. *Journal of Electrostatics*, 2016, vol. 82, no. 8, pp. 55–62.
- Lowke J.J., Morrow R. Theory of electric corona including the role of plasma chemistry. *Pure & Appl. Chem.*, 1994, vol. 66, no. 6, pp. 1287–1294.
- Van Thanh Dau, Thien Xuan Dinh, Tung Thanh Bui, Canh-Dung Tran, Hoa Thanh Phan, Tibor Terebessy. Corona based air-flow using parallel discharge electrodes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, vol. 79, no. 12, pp. 52–56.
- Ochistka dymovykh gazov TES s pomoshchyu elektrofiltrov* [Purification of combustion gases of thermal power plant with the help of electric precipitators]. Available at: <http://vei.ru/index.php?op>

- tion=com_content&task=view&id=164/ (accessed 15 February 2016).
11. Artamonov A.F. Chislennoe modelirovanie pokrytiya v elektricheskom pole [Numerical modeling of the coating in electric field]. *Electricity*, 2011, no. 11, pp. 46–54.
 12. Matveev A.V., Pyukke G.A. Capacitive control of permittivity of conductor insulation coatings. *Scientific sheets. Series: Mathematics. Physics*, 2015, no. 11 (208), Iss. 39, pp. 211–215. In Rus.
 13. *Pasport tekhnicheskogo ustroystva: pribor dlya kontrolya i obnuzheniya defektov izolyatsionnykh pokrytyy elektroiskrovym metodom «Korona 2.2» UALT.025.000.00PS* [Technical passport of the device: a device for monitoring and detecting defects in the insulating coating by the electric spark method «CROWN 2.2» UALT.025.000.00PS]. Available at: http://www.sk-ndt.ru/files/korona_22.pdf/ (accessed 15 February 2016).
 14. Andrianov V.R. Ustroystvo dlya kontrolya sploshnosti dielektricheskikh pokrytyy na vnutrenney poverkhnosti metallicheskih tsilindricheskikh izdeliy [Device for checking dielectric coats continuity on inner surface of cylindrical metal items]. *Vsemirnaya organizatsiya intellektualnoy sobstvennosti* [World intellectual property organization]. 1990–1992. Available at: <https://patentscope.wipo.int> (accessed 15 February 2016).
 15. Stishkov Yu.K., Kozlov V.B., Yakovlev A.N., Samusenko A.V. Vliyaniye bareara na formu i strukturu koronnogo razryada v vozdukh [Barrier effect on form and structure of the corona discharge in the air]. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 2010, vol. 46, no. 4, pp. 315–323.
 16. Afanasev S.B., Lavrenyuk D.S., Petrushenko I.N., Stishkov Yu.K. Nekotorye osobennosti koronnogo razryada v vozdukh [Peculiarities of the Corona Discharge in Air]. *Technical Physics*, 2008, vol. 78, no. 7, pp. 848–852.
 17. Vysokovoltnye kenotrony [High kenotron]. *Muзей elektronnykh raritetov* [Museums of electron rare objects]. Available at: <http://www.155la3.ru/kenotrons.htm> (accessed 15 February 2016).
 18. Raiser Yu.P. *Fizika gazovogo razryada* [Gas discharge physics]. Dolgoprudny, Intellect Publ. house, 2009. 736 p.
 19. Revshanov D.Ch. Issledovanie svoystv poverkhnosti polimernykh plenok iz PP i PE, aktivirovannykh koronnym razryadom [Studying the properties of the polymer film surface of PP and PE, activated by corona discharge]. *Peredacha, obrabotka, vospriyatie tekstovoy i graficheskoy informatsii. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Transmission, processing, perception of text and graphic information. International scientific-practical conference]. Yekaterinburg, URFA Publ. house, 2015. pp. 135–142.
 20. Aleksandrov N.L., Bazelyan E.M., Novitsky D.A. Vliyaniye vlazhnosti na svoystva dlinnykh strimerov v vozdukh [Influence of humidity on properties of long streamers in the air]. *ZhTF*, 1997, vol. 24, no. 9, pp. 86–91.
 21. Raiser Yu.P. *Fizika gazovogo razryada* [Gas discharge physics]. Moscow, Nauka Publ., 1992. 536 p.
 22. Bazelyan E.M., Raiser Yu.P. *Iskrovoy razryad* [Spark discharge]. Moscow, MFTI Press, 1997. 320 p.
 23. Mingjiang Ni, Xihui Wang, Gang Xiao, Kunzan Qiu, Guang Yang, Xiang Gao, Kefa Cen. Development of back corona discharge in a wire-cylinder electrostatic precipitator at high temperatures. *Powder Technology*, 2015, vol. 286, no. 12, pp. 789–797.
 24. Artit Yawootti, Panich Intra, Nakorn Tippayawong, Phadungsak Rattanadecho. An experimental study of relative humidity and air flow effects on positive and negative corona discharges in a corona-needle charger. *Journal of Electrostatics*, 2015, vol. 77, no. 10, pp. 116–122.
 25. Hong Luo, Xian-Deng Hou, Zhou Long. Miniaturized Corona Discharge-Atomic Emission Spectrometer for Determination of Trace Mercury. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2015, Iss. 9, vol. 43, no. 9, pp. 1291–1295.

Received: 02 March 2016.

Information about the authors

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

Alexey A. Mezhensky, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Rafael S. Rakhimov, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 528.88: 528.856: 502.065

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ РЕГИОНАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ЗЕМЕЛЬ НА ОСНОВЕ АТЛАСНОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ

Верхотуров Алексей Александрович¹,
ussr-91@mail.ru

Мелкий Вячеслав Анатольевич¹,
vamelkiy@mail.ru

¹ Технический нефтегазовый институт Сахалинского государственного университета,
Россия, 693008, г. Южно-Сахалинск, ул. Пограничная, 42.

Актуальность работы обусловлена тем, что оценка современного состояния земель, определение характера изменений компонентов природных комплексов, прогноз активизации негативных процессов, изменяющих ландшафты и все компоненты экосистем, не возможны без качественных данных, которые можно получить только с помощью хорошо организованных систем мониторинга на региональном уровне.

Цель работы: анализ возможностей систем, обеспечивающих экологический мониторинг на региональном уровне. Для достижения цели решены задачи: выявлены корреляционные связи внешних проявлений в рельефе с внутренними природными процессами и причины их возникновения, определены индикаторы направленности процессов, разработаны рекомендации по оптимизации функционирования региональных систем мониторинга на базе системного атласного геоинформационного картографирования.

Методы исследования. Выполнен анализ технических возможностей станций приема спутниковой информации с аппаратов TERRA, Landsat, NOAA и других на региональном уровне в Сахалинской области. При проведении исследований использовались методы математического и геоинформационного картографирования, статистические, комплексные физико-географические, пространственного анализа, тематического дешифрирования и др.

Результаты. Разработаны рекомендации по организации системы мониторинга Сахалинской области, определена архитектура сети исполнителей и техническое оснащение; внесено предложение решать задачи, поставленные перед региональным мониторингом земель на базе системного атласного геоинформационного картографирования и доступных данных дистанционного зондирования Земли в конкретных заданных масштабах. Для этого необходимо обеспечить прием данных с определенной периодичностью наблюдений. Рекомендовано применить систему регионального мониторинга, которая способна повысить оперативность и эффективность его проведения в Сахалинской области за счет кооперации, согласованной деятельности всех участников.

Выводы. Разработана теория, и заложена методологическая основа системы атласного геоинформационного картографирования территории Сахалинской области, на базе которой можно организовать комплексный мониторинг земель в регионе с использованием существующих геопорталов, а в лучшем случае с применением вновь созданного специализированного геопортала. Прием спутниковой информации должен осуществляться наземными станциями приема, расположенными в регионе.

Ключевые слова:

Мониторинг земель, геоинформационное картографирование, кадастр земельных ресурсов, космические съемки, охрана окружающей среды, геопортал, атлас карт.

Введение

По выражению В.И. Вернадского, наука и техника превратили деятельность человека в особую геологическую силу, преобразовавшую всю поверхность Земли [1]. Крупные промышленные комплексы, как правило, занимают большую территорию и оказывают значительное воздействие на окружающую среду. Оценка современного состояния земель, определение характера изменений компонентов природных комплексов, прогноз активизации негативных процессов, изменяющих ландшафты, невозможны без качественных данных, которые можно получить только с помощью хорошо организованного мониторинга. Организация мониторинга на региональном уровне – задача весьма сложная, а при условии необходимости ее выполнения – без всякого сомнения, актуальная.

Государственный мониторинг земель представляет собой систему наблюдений, оценки и прогнозирования, направленных на получение достоверной информации о состоянии земель, об их количе-

ственных и качественных характеристиках, их использовании и о состоянии плодородия почв [2]. Региональный мониторинг земель проводится с целью выявления состояния земельных ресурсов, определения изменений, которым они подвергаются, прогноза развития природных процессов и выработки рекомендаций по предотвращению негативных последствий.

Точная и достоверная количественная оценка изменений, происходящих под влиянием природных процессов, возможна лишь тогда, когда системы, осуществляющие мониторинг, обеспечены картографическими материалами, позволяющими распознавать их с достаточной детальностью и в соответствующем масштабе. Нужны специальные технологии для решения таких задач. В результате проведенных исследований разработана система регионального мониторинга, в основу которой заложены алгоритмы и технологии системного атласного геоинформационного картографирования (САГИК).

Анализ международного и отечественного опыта по созданию систем мониторинга земель

Впервые замысел создания Глобальной системы мониторинга окружающей среды (ГСМОС) возник на Стокгольмской конференции ООН по окружающей среде в 1972 г. для решения экологических проблем [3]. Основные требования к системе были разработаны в 1975 г., она начала формироваться в рамках программы United Nations Environment Programmed (ЮНЕП). Программа нацелена на заблаговременное выявление изменений, которые отрицательно воздействуют на человека. В рамках программы также отслеживаются параметры состояния геологической среды, почв, землепользования, ландшафтов и др. Сбор данных в системе ГСМОС осуществляется с помощью аэро- и космической съемки, проводится на наземных стационарных и передвижных станциях.

Выполненный анализ показывает, что существующие системы мониторинга, действующие в рамках международных программ на национальном уровне, в значительной степени различаются друг от друга и зависят от природных условий различных стран. В большинстве национальных проектов особое внимание уделяется мониторингу земель.

В Канаде проведена полная инвентаризация земель с оценкой плодородия. Канадский центр дистанционного зондирования (CCRS) в числе первых создал и использует географическую информационную систему (ГИС) позволяющую отслеживать тенденции глобальных изменений окружающей среды и вести кадастровый учет и оценку земельных ресурсов [4].

В Швеции все программы мониторинга окружающей среды базируются на изучении эталонных территорий, представленных характерными для Скандинавии лесными землями и опытными полями. Результаты исследований анализируются и служат основой для рекомендаций по использованию земель [5].

В США мониторингом земель занимается Агентство по защите окружающей среды, которое проводит научные исследования, разрабатывает рекомендации по охране природы, распределяет разрешения на природопользование и др. Национальная служба охраны почв США осуществляет сбор наземных данных и формирует базы данных (БД) съемки земель [6].

Мониторинг земель в Германии опирается в основном на данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В рамках мониторинга земель территориальные органы собирают данные о состоянии компонентов природной среды и их изменениях, а также разрабатывают мероприятия по охране природной среды.

В СССР в 70-е годы в рамках Госкомгидромета была организована Общегосударственная служба наблюдений и контроля состояния окружающей среды (ОГСНК).

В Российской Федерации в 1993 г. было принято Постановление Правительства РФ о создании системы экологического мониторинга [7]. Ответственность за выполнение отдельных функций в Единой государственной системе экологического мониторинга была возложена: на Минприроды, Росгидромет, Роскомзем, Роскомнедра и т. д. [8, 9]. Несмотря на то, что над решением проблем создания системы мониторинга работали столь различные и весильные ведомства, единая система так и не была создана спустя 30 лет с начала ее разработки.

Хорошо организован мониторинг земель сельскохозяйственного назначения. Выполняется Федеральной службой государственной регистрации, кадастра и картографии (Росреестр), которая с определенной периодичностью наземными и аэрокосмическими методами выявляет особенности состояния земель, а также дает оценку степени изменения почв и растительности.

В базы данных фонда информации Росреестра включены данные регулярных наблюдений за земельными ресурсами, справочные материалы и программное обеспечение для анализа состояния земель сельскохозяйственного назначения.

Возможно, что по отдельности разработаны все необходимые элементы для организации единой системы мониторинга и требуется лишь объединение усилий ведомств-участников, обладающих технологиями ведения покомпонентного мониторинга. Концепции, алгоритмы и технологии, позволяющие организовать наблюдения за определенными процессами в окружающей среде, разрабатывались многими учеными: В.П. Савиных обоснована возможность информационного обеспечения научных и прикладных исследований космической информацией [10]; В.Г. Бондуром и другими разработаны методы космического мониторинга природных катастроф и объектов нефтегазового комплекса [11–14]; В.А. Малинниковым созданы теория и методы информационного обеспечения мониторинга земель [15]; В.А. Мелким и другими разработаны теория аэрокосмического мониторинга вулканоперильных территорий и методы выявления катастрофических природных процессов на ранних стадиях [16–18]; В.С. Марчуковым – методики автоматизированного дешифрирования [19]; А.В. Садовым созданы теоретические основы применения аэрокосмических методов в инженерной геодинатике [20]; основы землепользования в крупных городах сформулированы А.П. Сизовым [21–22] и развиты Liu T., Yang X. [23]. Прекрасный обзор систем космического зондирования представлен в работе С.В. Гарбука, В.Е. Гершензона [24].

Среди исследований спектральной отражательной способности, применяемых при картографировании на основе данных дистанционного зондирования, выделяются труды Е.Л. Кринова [25], П. Кронберга [26]. Результаты разработки теории

и методов оценки и прогноза состояния природных ресурсов с использованием космических снимков представлены в работах А.Т. Зверева, В.В. Гавриловой [27]. Проблемы использования данных дистанционного зондирования при картографическом отображении результатов геоэкологического мониторинга рассмотрены в трудах С.А. Сладкопевцева, Varboux Chloé с соавторами [28, 29]. Научные основы использования топографических карт в целях экодиагностики территорий разработаны в трудах Т.В. Верещаки [30]. Теоретические основы анализа пространственной структуры ландшафтов на основе данных дистанционного зондирования разработаны В.В. Братковым, [31–33], Р. García-Llamas с соавторами [34], М. Marcantonio с соавторами [35], Martinez del С.Е. с соавторами [36]. Аэрокосмические методы географических исследований детально рассмотрены в трудах Ю.Ф. Книжникова, В.И. Кравцовой [37], Р. Kronberg [38]. Основные задачи создания системы глобального спутникового мониторинга лесов освещены в работах Е.А. Лупяна, С.А. Барталева [39, 40].

В процессе обсуждения на международных симпозиумах, посвященных освоению космического пространства, в Днепропетровске (Украина) в 2007 г., Королеве (Россия), Шанхае (Китай) и Глазго (Шотландия) в 2008 г. сформировались концепция и основные принципы организации International Global Monitoring AeroSpace System – Международной аэрокосмической системы глобального мониторинга (IGMASS, МАКСМ). IGMASS создается с целью наблюдения за состоянием околоземного космического пространства, атмосферы и литосферы, сбора и анализа информации и своевременного предупреждения о всевозможных угрозах. В состав системы входят наземный, авиационный и ракетно-космический комплексы.

Международные системы мониторинга могут быть созданы только на основе национальных, а те, в свою очередь, – на основе региональных. При создании региональных систем обязательно должны учитываться особенности природных условий региона, уровень развития промышленности и сельского хозяйства, состояние экосистем в регионе. В частности, системы должны содержать информацию об интенсивности использования земель и развития на них негативных процессов (их нарушениях, плодородии, заболачивании, нецелевом использовании и т. д.). Для осуществления мониторинга земель на региональном уровне необходимо создать систему, способную собирать, хранить, обрабатывать и передавать потребителям информацию о состоянии наблюдаемых объектов в доступном, прежде всего картографическом, виде. Обеспечение технической поддержки функционирования системы не представляется возможным без использования современных технологий геоинформационного картографирования [41, 42].

Обмен пространственными данными обычно производится с использованием геопорталов, которые обеспечивают поиск, просмотр, загрузку метаданных, а также скачивание пространственных данных в соответствии с правами доступа к необходимым материалам. В России на федеральном уровне функционируют кадастровая карта Росреестра, геопортал Роскосмоса, система мониторинга и атлас земель сельскохозяйственного назначения РФ.

Региональные геопорталы созданы в Москве, Санкт-Петербурге, Уральском федеральном округе, Приморском крае и ряде других регионов и городов. При этом работы по созданию и картографическому обеспечению геопорталов в ряде регионов страны только начинаются.

Анализ деятельности по наблюдению за состоянием природной среды территории

Изучение проблемы по доступным источникам показало, что на сегодняшний день комплексных систем мониторинга земель в регионах РФ нет. Реальные систематические работы по мониторингу земель с применением ДЗЗ в Сахалинской области ведутся весьма ограниченно. Им занимаются Дальневосточный филиал Российского федерального геологического фонда (ДФР Росгеолфонда, г. Южно-Сахалинск), Сахалинский государственный университет (СахГУ), Институт морской геологии и геофизики (ИМГиГ) ДВО РАН, Сахалинское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета, Главное управление МЧС России по Сахалинской области (в части сбора информации от юридических и физических лиц) и Сахалинский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (СахНИРО).

В *Дальневосточном филиале Росгеолфонда* работает группа дистанционных методов, осуществляющая прием данных дистанционного зондирования Земли с космических аппаратов типа Ресурс-01, NOAA, TERRA, в целях сбора информации для Государственного банка цифровой геологической информации (ГБЦГИ), и обработку оперативной космической съемки по направлениям:

- мониторинг лицензионных участков по добыче полезных ископаемых в Сахалинской области;
- анализ ледовой обстановки в Дальневосточном регионе;
- обнаружение и отслеживание очагов пожаров в Дальневосточном регионе;
- контроль за вулканической активностью на территории полуострова Камчатка и Курильских островов.

Станция приема спутниковой информации «УниСкан» обеспечивает сбор данных со сканера MODIS, полученных в режиме прямого вещания со спутника Terra.

Расчет расписания выполняется NASA ежедневно и находится на сервере Celestial WWW

(<http://celestrak.com>). Точное время для радиообмена со спутником определяется при помощи GPS-приемника. Данные принимаются 2–3 раза в день с охватом территории: с востока на запад – от Анадырского залива до Братской ГРЭС; с севера на юг – от шельфовой зоны Северного Ледовитого океана до острова Тайвань [43].

В *Институте морской геологии и геофизики (ИМГиГ) ДВО РАН* всегда уделялось большое внимание проблемам вулканической активности и мониторинга вулканоопасных территорий [44, 45], накоплен большой опыт контроля за состоянием вулканов с использованием данных дистанционно-зондирования.

Прогнозирование вулканических извержений в мировой практике выполняется на основе данных комплексных дистанционных геофизических и геохимических методов, которые позволяют получить разноплановую информацию о магматических процессах под вулканами. В России такого рода система развернута на Камчатке подразделениями Российской академии наук. Радиотелеметрическая сеть позволяет осуществлять мониторинг вулканической активности по сейсмическим данным на вулканах Авачинском, Корякском, Шивелуч, Безымянном, Ключевском и Плоский Толбачик [46, 47].

В 2003 г. для ведения работы по мониторингу активных вулканов Курильских островов в ИМГиГ ДВО РАН создана Сахалинская группа оперативного реагирования на вулканические из-

вержения – Sakhalin Volcanic Eruptions Response Team (SVERT). Главная задача группы SVERT – сбор и анализ всей доступной информации об активных вулканах и обмен информацией с заинтересованными партнерами (рис. 1).

Имеющиеся на Курильских островах сейсмостанции не могут быть использованы для контроля вулканической активности по причине удаленности от вулканов. При формировании системы мониторинга вулканоопасных территорий в первую очередь было организовано наблюдение за вулканами Тятя, Менделеева, Иван Грозный, Баранского, Чирип, Богдан Хмельницкий, Эбеко, Чикурачки и Алаид как наиболее опасных для населения Курильских островов. Для контроля активности вулканов используются изображения, передаваемые со сканирующих устройств спутников [44].

Зона ответственности группы SVERT включает территорию Курильских островов от о. Кунашир до о. Онекотан. Наблюдения за вулканами северной группы (о. Парамушир и о. Атласова) проводит Камчатская группа оперативного реагирования на вулканические извержения (KVERT) Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (рис. 2) [48, 49].

С 2012 г. группой SVERT помимо данных радиометра MODIS со спутника TERRA, поставляемых Дальневосточным филиалом Росгеолфонда (г. Южно-Сахалинск), используется также информация сканеров AVHRR/POES NOAA, поставляемых центром регионального спутникового монито-



Рис. 1. Схема взаимодействия группы SVERT [45]

Fig. 1. Scheme of interaction of the SVERT group [45]

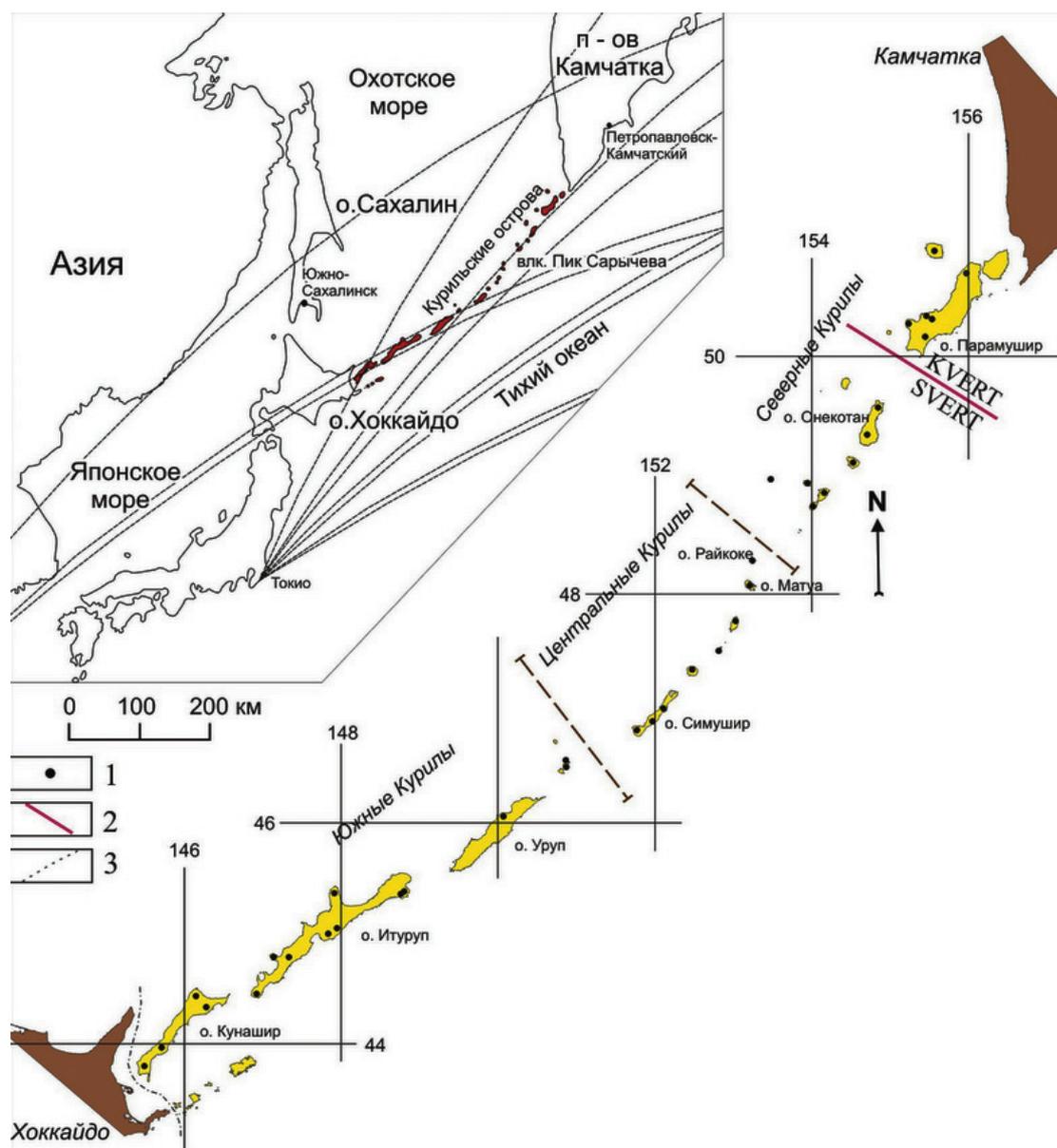


Рис. 2. Зоны ответственности за выполнение мониторинга вулканической опасности для авиатрасс, выполняемого группами SVERT и KVERT [45]

Fig. 2. Zones of responsibility for monitoring volcanic hazard for airway performed by KVERT and SVERT [45]

ринга окружающей среды ДВО РАН (www.satellite.dvo.ru). Центр осуществляет мониторинг земель и экологического состояния дальневосточных морей [50]. На Камчатке состояние вулканических построек можно наблюдать даже в режиме реального времени [51].

Сахалинское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета не имеет собственных станций приема спутниковой информации. Сбор данных дистанционного зондирования в системе Росгидромета осуществляет ФГБУ НИЦ «Планета» – ведущая организация по развитию национальных космиче-

ских систем гидрометеорологического, океанографического, гелиогеофизического мониторинга и мониторинга окружающей среды, а также по приему и обработке данных с зарубежных спутников. Функции приема, обработки, архивирования и распространения данных возложены на центры: Европейский (г. Москва, Обнинск, Долгопрудный), Сибирский (г. Новосибирск), Дальневосточный (г. Хабаровск) и «Планета» (рис. 3). Сбор и обработка основного объема данных осуществляются московским НИЦ «Планета» [52].

По состоянию на 2016 г. российская группировка спутников метеорологического и природно-

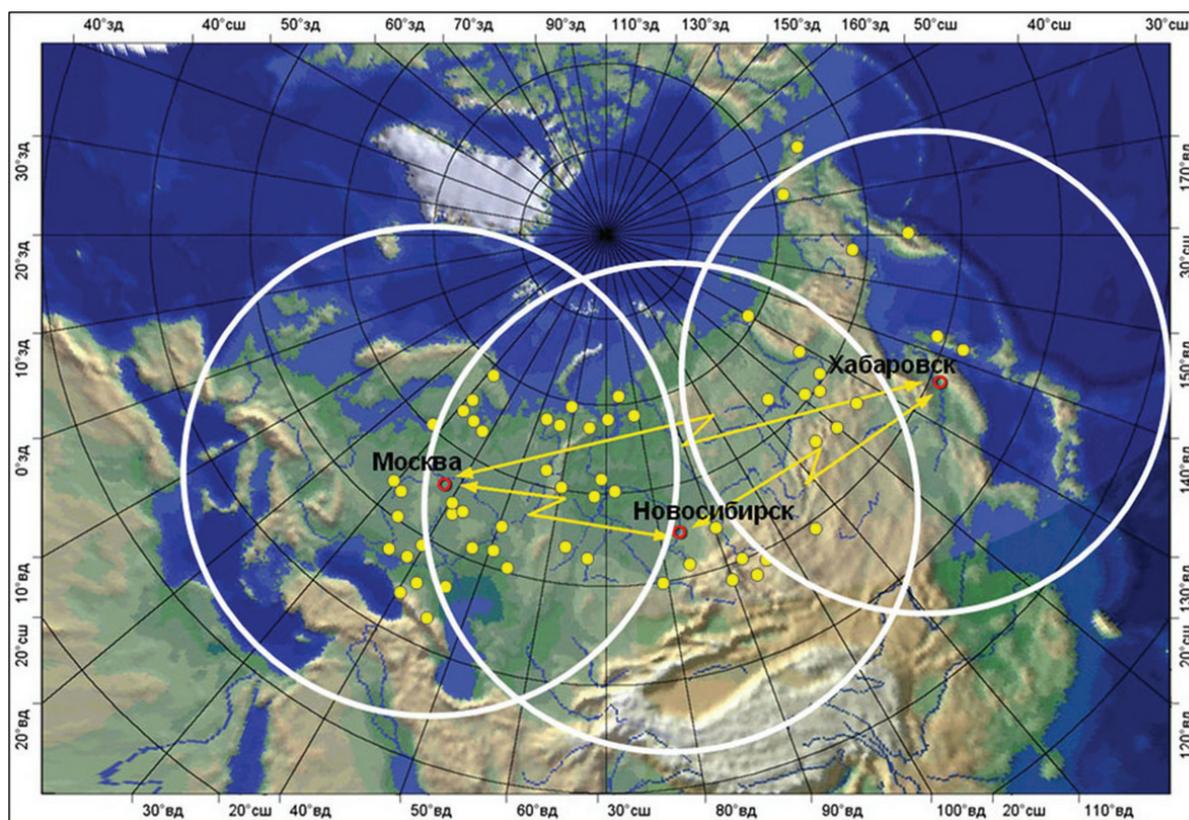


Рис. 3. Размещение наземного сегмента космической подсистемы Росгидромета [52]

Fig. 3. Location of the ground segment of the Roshydromet Space-based subsystem [52]

ресурсного назначения включает в себя пять космических аппаратов: геостационарный спутник «Электро-Л» № 1 и четыре полярно-орбитальных спутника – «Метеор-М» № 1, «Метеор-М» № 2, «Канопус-В» и «Ресурс-П».

Главное управление МЧС России по Сахалинской области участвует в работе по совершенствованию системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций, а также по разработке и внедрению в установленном порядке показателей риска на территориях и объектах экономики. В настоящее время центр мониторинга, работавший в ГУ ранее, упразднен.

В Сахалинском научно-исследовательском институте рыбного хозяйства и океанографии функционирует отдел исследований среды и мониторинга антропогенного воздействия. Сектор инструментального мониторинга этого отдела осуществляет анализ пространственно-временной изменчивости физико-химических свойств водных масс Охотского и северной части Японского морей, их влияния на воспроизводство и распределение гидробионтов. Исследования ведутся с использованием данных спутникового мониторинга с метеорологических спутников NOAA. В базе данных СахНИРО собрана информация о температуре поверхности океана (ТПО) с 1997 г., поверхностной концентрации хлорофилла с 2001 г. и ледовой обстановке с

2003 г. в квадрате со сторонами 42° – 60° с. ш. и 135° – 163° в. д., включающем в себя акватории Татарского пролива и Охотского моря [53].

Станция приема спутниковой информации состоит из приемной параболической антенны диаметром 1 м, предназначенной для приема данных со спутников NOAA (США), FY-1C/D (Китай), приемника HR 300 для приема HRPT и GPS-антенны для коррекции времени по навигационным спутникам.

В результате выполненного анализа определено, что в настоящее время в Сахалинской области крупномасштабная топографическая основа (1:50 000) имеется не для всей территории области. Поэтому необходимо создать систему обеспечения картографическими материалами в крупных масштабах, необходимыми для визуализации результатов мониторинга земель. Воплощать в жизнь такую систему следует с помощью геопортальных технологий.

Разработка региональной системы мониторинга земель

Разработка подсистемы сбора, хранения данных и обеспечения доступа к ним

Обобщенный опыт показывает, что формирование региональной системы мониторинга земель целесообразно начинать с создания геопортала, который должен обеспечивать доступ к данным всем

участникам (администраторам и потребителям). Методологических подходов на начальном этапе построения архитектуры системы может быть несколько. В данном случае предлагаем выбрать один из двух вариантов доступа к данным. Данные о мониторинге земель можно разместить на геопортале инфраструктуры пространственных данных Российской Федерации, доступ к которому обеспечивается Росреестром, или создать аналогичный новый ресурс.

Основными компонентами архитектуры геопортала должен быть центральный узел региональной системы мониторинга земель и ее периферийные узлы, расположенные в районах и на предприятиях. Центральный узел разрабатывается и внедряется как один из узлов интегрированной сети Российской информационной системы пространственных данных.

Архитектура геопортала должна включать [54]:

- подсистему метаданных, позволяющую вести поиск в базе метаданных, а также в регистрах подсистем данных, прикладных схем и сервисов;
- подсистему данных, обеспечивающую хранение данных, их преобразование в стандартизованное представление и обратно для привычной визуализации;
- подсистему прикладных схем, включающих легенды карт различного тематического содержания;
- подсистему сервисов, которая будет содержать:
 - поисковые сервисы, позволяющие искать наборы данных на основе метаданных;
 - сервисы визуализации, предоставляющие возможности просмотра данных;
 - сервисы для скачивания информации, позволяющие копировать наборы пространственных данных, а также обеспечивающие прямой доступ к данным;
 - сервисы, дающие возможность трансформировать наборы пространственных данных для удобства пользования;
 - возможности геокодирования для связи географического названия пространственного кода и т. д. с определенным пространственным представлением;
 - сервисы для вызова других (удаленных) сервисов.

Интерфейс системы представлен веб-порталом, поэтому основным методом доступа пользователя к информации является обычный доступ к веб-страницам через любой браузер. При разработке архитектуры геопортала необходимо отдавать приоритет обеспечению защиты информации и стабильности работы системы, а также организации сетевого взаимодействия участников, позволяющего повысить стабильность работы системы за счет создания нескольких центральных серверов. Таким образом, при отказе одной из серверных станций система продолжает функционировать и обрабатывать заявки пользователей [55, 56].

Иные способы доступа к хранилищам данных при современном уровне развития геоинформационных технологий реализовать намного сложнее, поэтому не представляется возможным обеспечить высокую точность географической привязки к крупномасштабной топографической основе без доступа к системе атласного геоинформационного картографирования с помощью геопортальных технологий.

Разработка подсистемы приема данных дистанционного зондирования

Сформировать систему регионального мониторинга, позволяющую оперативно оценивать текущее состояние земель на современном этапе развития науки и техники невозможно без использования данных дистанционного зондирования.

Как показывает опыт, станция УниСкан™ или ее аналоги позволяют осуществлять прием данных в режиме реального времени в радиусе до 2,5 тыс. км как с российских (Метеор-М, Канопус В, Ресурс-П), так и зарубежных космических аппаратов (TERRA, Aqua, Suomi NPP, FengYun-3, SPOT 6/7, EROS-B, Landsat-8, Sentinel-1A, KOMPSAT-3, RADARSAT-2, TERRA (SAR-X), COSMO-SkyMed и др.) (табл. 1) [57–64].

Дешифрирование космических снимков позволяет создавать оценочные карты фактического состояния земель. Сравнение разновременных снимков позволяет строить карты динамики природных процессов. С их помощью можно оценивать динамику развития процессов и явлений в конкретных геосистемах и уже на этих данных основывать прогноз. Для решения конкретных оценочных и аналитических задач космические снимки должны иметь определенную разрешающую способность, съемки должны выполняться через установленный период времени. Выполненные эксперименты и анализ опыта работы с данными дистанционного зондирования в ведомствах на территории Сахалинской области показали, что при наличии финансовой поддержки крупномасштабные картографические материалы можно регулярно обновлять, обеспечивая их достаточно высокое качество.

Разработка алгоритмов и технологий системного атласного геоинформационного картографирования

Любая система, которая предназначена для анализа пространственно-ориентированных данных, не может корректно отображать их распределение в пространстве без выполнения при предварительной обработке точной координатной привязки.

Алгоритмы и технологии системы регионального мониторинга земель (рис. 4) должны обеспечить выполнение картографирования в требуемых масштабах и решение аналитических задач с целью выявления состояния экосистем и земельных ресурсов.

Информация в базах данных (БД) разделяется по компонентам географической оболочки, а затем по трем масштабным уровням контролируемого процесса или явления, что облегчает систематиза-

цию информации в БД атласного геоинформационного картографирования. Далее нами определены требования к периодичности наблюдений для конкретных решаемых задач, которые проводятся ре-

Таблица 2. Спутниковая информация и периодичность ее получения, достаточная для функционирования системы регионального мониторинга [65–68]

Table 2. Satellite information and periodicity of its receiving, sufficient for the Regional monitoring system functioning [65–68]

Геосистемы Geosystems	Решаемые задачи Solved problem	Периодичность наблюдений Frequency of observations	Обеспечивающие спутники Providing satellites
Литосфера Lithosphere	изменения в тектоносфере changes in tectonosphere	по факту as received	Terra, Aqua (MODIS), Suomi NPP
	сейсмического районирования seismic zoning	10 лет, по факту 10 years, by fact	Landsat 8
	изменения земной поверхности changes in the earth's surface мониторинг геологических процессов monitoring of geological processes мониторинг нарушенных земель monitoring of disturbed lands мониторинг затопляемых земель monitoring of flooded land	1 год, по факту 1 year, as received 1 год, по факту 1 year, as received 1 год, по факту 1 year, as received 10 лет, по факту 10 years, as received	SPOT 6–7, Landsat 8, Zi Yuan (ZY)-1-02C, Sentinel-2
Атмосфера Atmosphere	мониторинг переноса вулканического пепла monitoring of volcanic ash transfer мониторинг циклонов monitoring of cyclones	сутки, по факту day, as received	Terra, Aqua, Suomi NPP, NOAA
	изменения радиационного баланса changes in radiation balance	сутки day	Terra, Aqua, Suomi NPP
	мониторинг загрязнения атмосферного воздуха monitoring of atmospheric air pollution		Terra, Aqua, Suomi NPP, SPOT 6/7
Гидросфера Hydrosphere	измерение температуры, волнения моря temperature measurement and rough seas	1 месяц, по факту 1 month, by fact	Terra, Aqua, Suomi NPP
	мониторинг загрязнения водных объектов monitoring of water pollution		Terra, Aqua, Suomi NPP, SPOT 6/7, Landsat 8
	изменения размеров и положения водных объектов change in size and position of water reservoirs мониторинг наводнений flood monitoring мониторинг ледового и снежного покрова monitoring of ice and snow cover	10 лет, по факту 10 years, as received по факту as received сутки (в сезон) day (in season)	SPOT6/7, Landsat 8, Terra, Aqua, Suomi NPP, Sentinel-2
Биосфера Biosphere	районирование лесов и почв zoning of forests and soil мониторинг лесистости monitoring of forest cover	20 лет 20 years 1 год 1 year	Landsat 8, SPOT 6/7, Terra, Aqua MODIS
	мониторинг типологического состава и продуктивности угодий monitoring of typological composition and land productivity мониторинг состояния почв monitoring of soil condition	5 лет 5 years 2 года 2 years	Landsat 8, SPOT 6/7, Zi Yuan (ZY)-1-02C
	мониторинг состояния и границ растительного покрова monitoring of vegetation status and borders изменения биомассы biomass change	1 год 1 year 1 месяц 1 month	SPOT 5–7, Landsat 8, Terra, Aqua MODIS
Техносфера Technosphere	мониторинг геоэкологических проблем monitoring of geoeological problems	1 год 1 year	Terra, Aqua, Suomi NPP
	мониторинг ЧС monitoring of emergencies	по факту by fact	Landsat 8, SPOT 6/7, Sentinel-2
	мониторинг состояния и использования земель monitoring of lands condition and use	1 год 1 year	Landsat 8, SPOT 6/7, Zi Yuan (ZY)-1-02C, Sentinel-2

гулярно через определенные интервалы времени. Также определены спутниковые системы, способные извлечь данные для решения поставленных задач (табл. 2).

Создание карты любого тематического содержания начинается с выбора математической основы. В качестве математической основы САГИК целесообразно использовать базовые параметры, широко используемые в ArcGIS: референц-эллипсоид – ГСК-2011, проекция для карт масштабов крупнее 1:1 000 000 – Гаусса–Крюгера, мельче – нормальная коническая равнопромежуточная по меридианам, датум – ПЗ-90 [65]. Используемый масштабный ряд: 1:100 000 – 1:1 000 000. В ArcGIS при переходе от одного масштаба к другому можно проводить генерализацию при помощи набора инструментов модуля ArcToolBox, через свойства слоя или же используя атрибутивную выборку.

Для построения векторной географической основы используются топографические карты Генштаба, Росреестра, ГосГисЦентра, ЦМР – SRTM и космические снимки.

Организация обработки данных в системе регионального мониторинга земель осуществляется с помощью САГИК. Для обеспечения построения оперативных тематических карт с высокой детальностью необходимо сформировать БД, насыщенную информацией, полученной при оцифровке существующих карт, а также фондовой, литературной и данными космической съемки (рис. 5).

Данные, поступающие в БД, обеспечиваются пространственной привязкой. Выполняется тематическое дешифрирование данных ДЗЗ. Результаты векторизуются и обеспечиваются атрибутивной информацией.

В БД содержится характерная для региона информация о компонентах среды, которая помогает обеспечить мониторинг земель тематическими картами с учетом местной специфики, а также наборы условных знаков для карт определенной тематической направленности.

Для обеспечения мониторинга земель региона кроме традиционных тематических разделов должен быть обязательно включен блок карт «Современное состояние и мониторинг земель» (табл. 3).

Блок насыщается картами фактического состояния земель, оценки его динамики и прогнозными. Кроме того, составляются карты рекомендательного характера с определенными эталонными участками, предназначенными для наземных подспутниковых наблюдений. Для принятия управленческих решений создаются прогнозные карты для целенаправленной нейтрализации негативных процессов. При анализе данных должны использоваться статистические методы [69, 70].

Поступление новых данных, их обработка, составление карт пополняют базы данных, тем самым образуя структуру системы, обеспечивающую мониторинг земель.

Данные мониторинга состояния экосистем (в том числе земель различного назначения) необходимо проводить покомпонентно, учитывая специфику физико-географических особенностей исследуемого региона. Все данные о процессах, характерных для изучаемого региона, целесообразно представлять в виде карт различного тематического содержания. Обеспечить насыщение информацией тематических карт можно при помощи разработанных технологических схем для каждого из районов островного региона, которые в совокупности будут

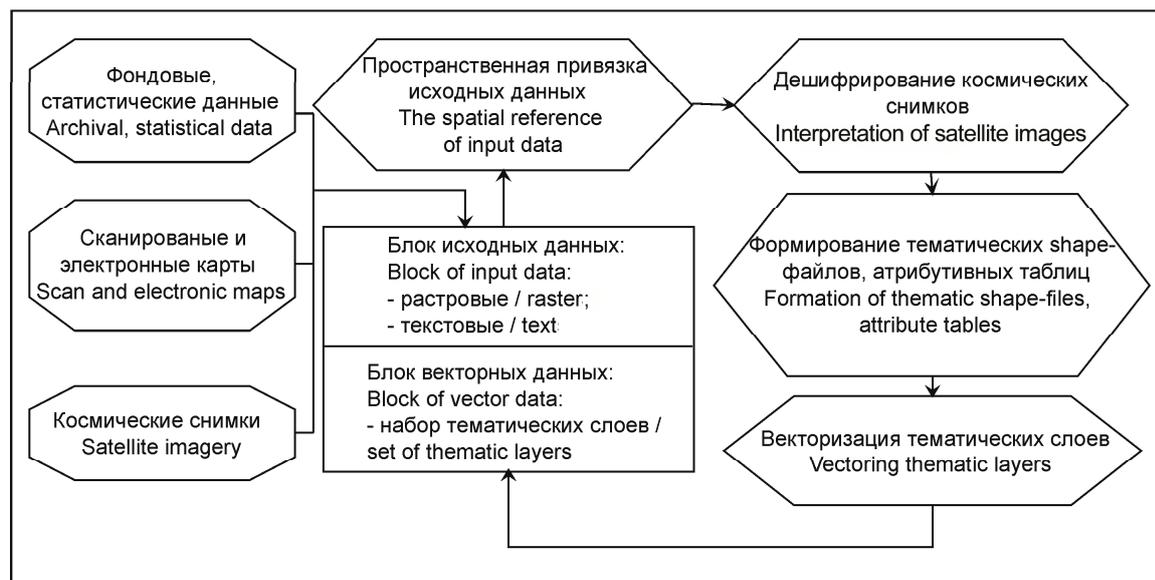


Рис. 5. Структура БД системного геоинформационного атласного картографирования Сахалинской области

Fig. 5. Structure of the database of systematic atlas geoinformation mapping for Sakhalin region

Таблица 3. Структура блока карт «Современное состояние и мониторинг земель»

Table 3. Structure of the block of maps «Current state and monitoring of lands»

Карты рекомендуемых эталонных участков для наземных подспутниковых наблюдений Maps of the recommended reference lands for ground-based ground truth observations	
Карты качественной и количественной оценки состояния земель (степени развития): Maps of qualitative and quantitative evaluation of land status (degree of development):	
эрозионных процессов erosion processes подтопления земель lands flooding переувлажненности земель lands overmoistened захламленности земель lands dirtiness загрязненности земель нефтью и нефтепродуктами lands contamination with oil and oil products	склоновых процессов slope processes заболоченности земель lands waterlogged нарушенности земель lands disturbance загрязненности тяжелыми металлами contamination with heavy metals
Карты динамики процесса Map of process dynamics	
Прогнозные карты развития процесса Forecast maps of process development	
Карты рекомендуемых мероприятий по уменьшению влияния негативных процессов Maps of recommended actions to reduce the impact of negative processes	

служить основой для системного атласного геоинформационного картографирования, что позволит оценить состояние земель и в конечном итоге сделать мониторинг достоверным и оперативным.

Рассмотрим пример того, как разработанные алгоритмы сбора информации из разных источников и технологические схемы (рис. 6), по которым возможно построение тематических карт, применяя ГИС и данные ДЗЗ, позволяют оценивать динамику протекающих процессов.

Выявление распространенности земель, нарушенных в результате деятельности горнодобывающих производств, зафиксированное на разновременных космических снимках, позволяет выполнить оценку этих изменений. Снимки подвергались цифровой обработке, визуально анализировались и дешифрировались. Выделенные участки векторизованы и перенесены на карту изменений площади нарушенных земель промышленности (рис. 7). Так, в 1995 г. площади нарушенных земель составили 82,39 га, а к 2014 г. – 513,54 га. Результаты численной оценки показывают, что площадь нарушенных земель за 19 лет увеличилась на 431,15 га.

Далеко не все задачи по оценке состояния земель можно решить, опираясь на доступную космическую информацию. Одним использованием космических снимков невозможно обеспечить универсальность и высокую точность результатов регионального мониторинга. Повышению точно-

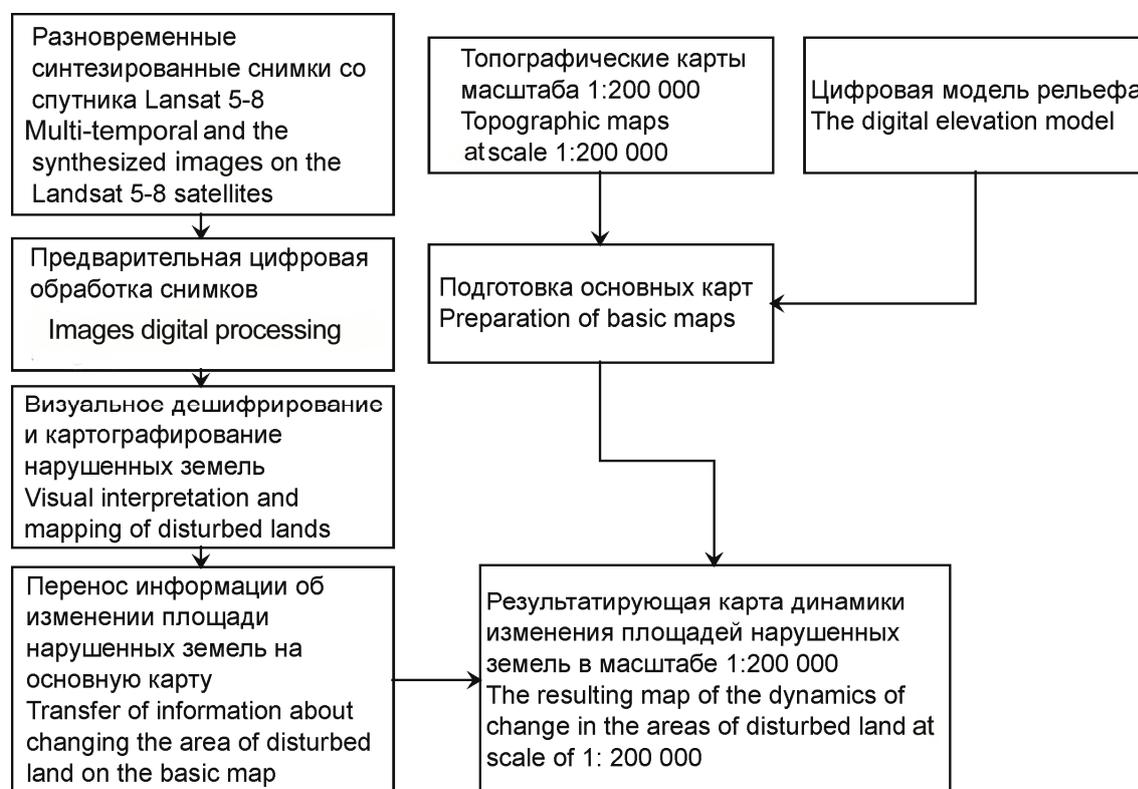


Рис. 6. Технологическая схема построения карты динамики нарушенности земель

Fig. 6. Technological scheme of mapping the dynamics of land disturbance

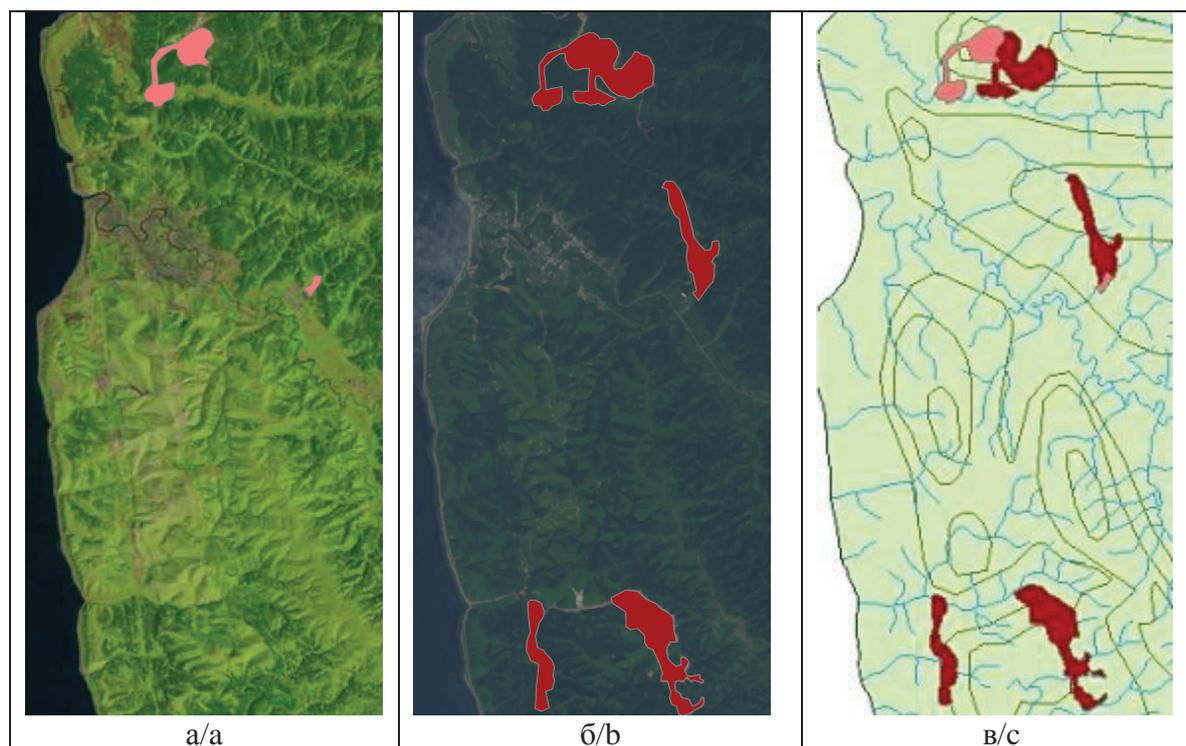


Рис. 7. Нарушенные земли на космических снимках: а) в 1995; б) 2014 г.; в) фрагмент результирующей карты изменения площади нарушенных земель

Fig. 7. Disturbed lands on the space images in: a) 1995; b) 2014; c) the fragment of the resulting map of the change in the disturbed lands area

сти результатов дешифрирования снимков поможет проведение узконаправленных либо комплексных наблюдений на местности. Однако подобные исследования значительно повысят затраты на проведение мониторинга.

Тем не менее предлагаемая система регионального мониторинга вполне способна значительно повысить оперативность и эффективность его проведения в Сахалинской области за счет кооперации, согласованной деятельности всех участников, исключая дублирующие работы по решению задач, накоплению данных, полученных при осуществлении космического и наземного мониторинга в совместно используемой БД системного атласного геоинформационного картографирования.

Заключение

Анализ деятельности в области мониторинга земель показал, что она организована практически во всех странах в рамках национальных систем мониторинга природной среды, которые прилагают немалые усилия для объединения в единую глобальную систему. В состав национальных систем входят подсистемы космического мониторинга. К настоящему времени сформирована концепция и основные принципы организации IGMASS, или МАКСМ, которая будет обеспечивать наблюдение за состоянием околоземного космического про-

странства, атмосферы и литосферы, сбора и анализа информации и своевременного предупреждения о всевозможных угрозах. В Сахалинской области крупномасштабная топографическая основа (1:50 000) имеется не для всей территории области. Предстоит большая работа по созданию базы данных о состоянии территории.

Работу картографических сервисов систем регионального мониторинга земель можно обеспечить только путем точной привязки пространственных данных с использованием системного атласного геоинформационного картографирования с оперативным обновлением информации в БД, на основе данных дистанционного зондирования, подтвержденных наземными исследованиями.

Многообразие видов мониторинга по масштабу и видам наблюдаемых процессов может обеспечить высокоточное тематическое картографирование оперативным обновлением на основе ДЗЗ с использованием современных ГИС-технологий, таких как программная среда ArcGIS.

В ходе нашей работы определены параметры математической основы, разработана структура БД и алгоритмы сбора данных о состоянии отдельных компонентов среды, в том числе земель, для создания системного атласного геоинформационного картографирования Сахалинской области в программной среде ArcGIS, которая дает возмож-

ность выполнять в кратчайшие сроки разномасштабное тематическое картографирование и производить обновление карт.

В итоге выполненного исследования:

- разработаны рекомендации по организации системы мониторинга Сахалинской области, определен ее состав, техническое оснащение;
- предложено решать задачи, поставленные перед региональным мониторингом земель конкретного масштаба с применением системного атласного геоинформационного картографирования и доступных данных ДЗЗ;
- рекомендована система регионального мониторинга, которая способна повысить оператив-

ность и эффективность его проведения в Сахалинской области за счет кооперации, согласованной деятельности всех участников.

Таким образом, разработана теория и заложена методологическая основа системного атласного геоинформационного картографирования территории Сахалинской области, на базе которой возможно организовать комплексный мониторинг земель в регионе с использованием существующих геопорталов, а в лучшем случае – с применением вновь созданного специализированного геопортала. Прием спутниковой информации должен осуществляться наземными станциями приема, расположенными в регионе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вернадский В.И. Размышления натуралиста. В 2 кн. Кн. 1: Пространство и время в неживой и живой природе. – М.: Наука, 1975. – 173 с.
2. Земельный кодекс Российской Федерации от 25.10.2001 № 136-ФЗ (ред. от 30.12.2015) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2016). URL: <http://legalacts.ru/kodeks/ZK-RF/> (дата обращения: 10.06.2016).
3. Stockholm Declaration on the Human Environment // Report of the United Nations Conference on the Human Environment, UN Doc.A/CONF.48/14, at 2 and Corr.1 (1972).
4. Волков С.Н. Опыт землеустройства на землях сельскохозяйственного назначения в США и Канаде. – М.: ГУЗ, 2012. – 44 с.
5. Emmelin L., Cherp A. National environmental objectives in Sweden: a critical reflection // Journal of Cleaner Production. – 1 June 2016. – V. 123. – P. 194–199.
6. Monitoring and predicting the fecal indicator bacteria concentrations from agricultural, mixed land use and urban stormwater runoff / M.A. Paule-Mercado, J.S. Ventura, S.A. Memon, D. Jahng, J.-H. Kang, C.-H. Lee // Science of the Total Environment. – 15 April 2016. – V. 550. – P. 1171–1181.
7. Постановление Совета министров – Правительства Российской Федерации от 24 ноября 1993 года № 1229 «О создании Единой государственной системы экологического мониторинга» // Собрание актов Президента и Правительства РФ, 29.11.1993, № 48, ст. 4661. URL: <http://base.garant.ru/2108166/> (дата обращения: 10.03.2016).
8. Положение о государственном экологическом мониторинге (государственном мониторинге окружающей среды) и государственном фонде данных государственного экологического мониторинга (государственного мониторинга окружающей среды) (с изменениями на 10 июля 2014 года). URL: <http://standartgost.ru/g/pkey-14293779851> (дата обращения: 10.03.2016).
9. Постановление Правительства Российской Федерации от 9 августа 2013 года № 681 «О государственном экологическом мониторинге (государственном мониторинге окружающей среды) и государственном фонде данных государственного экологического мониторинга (государственного мониторинга окружающей среды)» // Собрание законодательства Российской Федерации, 07.04.2003, № 14. URL: <http://base.garant.ru/70430724/> (дата обращения: 10.03.2016).
10. Савиных В.П. Информационное обеспечение научных и прикладных исследований на основе космической информации // Перспективы науки и образования. – 2015. № 2 (14). – С. 51–59.
11. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Механизмы формирования линейментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий // Исследование Земли из космоса. – 2007. – № 1. – С. 47–56.
12. Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. – М.: Научный мир, 2009. – 692 с.
13. Remote Sensing of Ships and Offshore Oil Platforms and Mapping the Marine Oil Spill Risk Source in the Bohai Sea / Qianguo Xing, Ruolin Meng, Mingjing Lou, Lei Bing, Xin Liu // Aquatic Procedia. – March 2015. – V. 3. – P. 127–132.
14. Pisoni J.P., Rivas A.L., Piola A.R. Satellite remote sensing reveals coastal upwelling events in the San Matias Gulf – Northern Patagonia // Remote Sensing of Environment. – September 2014. – V. 152. – P. 270–278.
15. Малинников В.А. Теория и методы информационного обеспечения мониторинга земель: Тематическая обработка видеоизображений: дис.... д-ра тех. наук: 05.24.04. – М., 1999. – 351 с.
16. Predicting eruptions from precursory activity using remote sensing data hybridization / K.A. Reath, M.S. Ramsey, J. Dehn, P.W. Webley // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 15 July 2016. – V. 321. – P. 18–30.
17. Прогнозирование взрывных вулканических извержений по данным дистанционного зондирования / В.А. Мелкий, Ю.М. Черниговский, Д.В. Долгополов В.С. Марчуков // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1998. – № 3. – С. 123–129.
18. Мелкий В.А., Ферберова Л.В. Разработка методики автоматизированного дешифрирования опустыненных территорий по аэрокосмическим изображениям // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1998. – № 6. – С. 130–144.
19. Мелкий В.А., Марчуков В.С., Шитикова М.В. Мониторинг сейсмической опасности Алтайско-Саянской складчатой зоны по данным дистанционного зондирования // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1999. – № 3. – С. 107–118.
20. Садов А.В. Аэрокосмические методы в инженерной геодинимике. – М.: Недра, 1988. – 206 с.
21. Лебедев П.П., Сизов А.П. Картографическая составляющая системы мониторинга городских земель // География и природные ресурсы. – 2012. – № 4. – С. 150–154.
22. Сизов А.П. Экологические основы землепользования в сверхкрупном городе. – М.: Русайнс, 2015. – 120 с.
23. Liu Ting, Yang Xiaojun. Monitoring land changes in an urban area using satellite imagery, GIS and landscape metrics // Applied Geography. – January 2015. – V. 56. – P. 42–54.
24. Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. – М.: Издательство «А и Б», 1997. – 296 с.

25. Кринов Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований. М.; Л.: АН СССР, 1947. – 272 с.
26. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии. – М.: Мир, 1988. – 349 с.
27. Зверев А.Т., Гаврилова В.В. Разработка теории и методов оценки и прогноза состояния природных ресурсов с использованием космических снимков // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 5. – С. 44–47.
28. Сладкопепцев С.А. Достижения и проблемы геоморфологии, картографии, геоэкологии и прикладной космонавтики. – М.: Изд-во МИИГАиК, 2013. – 199 с.
29. Mapping slope movements in Alpine environments using TerraSAR-X interferometric methods / Ch. Barboux, T. Strozzi, R. Delaloye, U. Wegmüller, C. Collet // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – November 2015. – V. 109. – P. 178–192.
30. Верещака Т.В., Качаев Г.А. Топографические карты в системе экодиагностики территории: оценка информативности природных объектов // Геодезия и картография. – 2011. – № 10. – С. 14–19.
31. Атаев З.В., Братков В.В. Динамика селитебной освоенности ландшафтов формирующейся Махачкалинско-Каспийской агломерации (на основе данных дистанционного зондирования) // Мониторинг. Наука и технологии. – 2013. – № 4. – С. 11–16.
32. Балгуев Т.Р., Братков В.В. Оценка внутригодовой изменчивости территории о-ва Тюлений (по материалам дистанционного зондирования) // Мониторинг. Наука и технологии. – 2015. – № 1. – С. 44–51.
33. Дистанционное зондирование территории Северного Кавказа / В.В. Братков, Ш.Ш. Заурбеков, П.В. Ключин, А.Н. Марьин // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2011. – № 4 (76). – С. 69–80.
34. Using remote sensing products to classify landscape. A multi-spatial resolution approach / P. Garcia-Llamas, L. Calvo, J.M. Álvarez-Martínez, S. Suárez-Seoane // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – August 2016. – V. 50. – P. 95–105.
35. The integration of Artificial Night-Time Lights in landscape ecology: a remote sensing approach / Marcantonio Matteo, Pareeth Sajid, Rocchini Duccio, Metz Markus, Garzon-Lopez Carol X., Neteler Markus // Ecological Complexity. – June 2015. – V. 22. – P. 109–120.
36. Evaluation of forest cover change using remote sensing techniques and landscape metrics in Moncayo Natural Park (Spain) / Martínez del Castillo Edurne, García-Martin Alberto, Aladrén Luis Alberto Longares, Luis Martín // Applied Geography. – August 2015. – V. 62. – P. 247–255.
37. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И. Тематическое дешифрирование многозональных космических снимков // Исследование Земли из космоса. – 1980. – № 1. – С. 88–94.
38. Kronberg P. Zur geologischen auswertung von luftbildern // Photogrammetria. – December 1969. – V. 25. – Iss. 2–3. – P. 75–85.
39. Основные задачи и перспективы создания системы глобального спутникового мониторинга лесов / С.А. Бартаев, Д.В. Ершов, А.С. Исаев, Е.А. Лупян // Лесоведение. – 2011. – № 6. – С. 3–15.
40. Бартаев С.А., Лупян Е.А. Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10. – № 1. – С. 197–214.
41. Rahman Naima, Ansary Mehedi A., Islam Ishrat. GIS based mapping of vulnerability to earthquake and fire hazard in Dhaka city, Bangladesh // International Journal of Disaster Risk Reduction. – September 2015. – V. 13. – P. 291–300.
42. El Baroudy A.A. Mapping and evaluating land suitability using a GIS-based model // CATENA. – May 2016. – V. 140. – P. 96–104.
43. Геоморфологический мониторинг лагунных берегов Сахалина / П.Ф. Бровко, А.В. Малюгин, Н.С. Терентьев, В.Н. Храмушин // Мореходство и морские науки: избранные доклады 4-й Сахалинской региональной морской научно-технической конференции. – Южно-Сахалинск: Сахалинская областная типография, 2013. – С. 133–142.
44. Вулканологические исследования на Курильских островах: итоги и перспективы / В.М. Гранник, А.В. Рыбин, Б.Н. Пискунов, М.В. Чибисова // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2011. – № 6 (160). – С. 13–18.
45. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Коротеев И.Г. Проблемы мониторинга вулканической активности на Курильских островах // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2010. – № 3. – С. 64–71.
46. Гордеев Е.И., Гирина О.А. Вулканы и их опасность для авиации // Вестник Российской академии наук. – 2014. – Т. 84. – № 2. – С. 134–142.
47. Kirianov V.Yu. Volcanic Ash in Kamchatka as a Source of Potential Hazard to Air Traffic // Volcanic Ash and Aviation Safety: Proc. First Intern. Symp. on Volcanic Ash and Aviation Safety // US Geological Survey Bull. – 1992. – V. 2047. – P. 57–63.
48. Гирина О.А., Гордеев Е.И. Проект KVERT – снижение вулканической опасности для авиации при эксплозивных извержениях вулканов Камчатки и Северных Курил // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2007. – № 2. – С. 100–109.
49. The Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team (KVERT) Fact Sheet 064-02 / V.Yu. Kirianov, Ch.A. Neal, E. Gordeev, T.P. Miller, J.W. Hendley II, P. Stauffer. URL: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/fs06402/> (дата обращения: 11.03.2016).
50. Организация исследований по оценке экологического состояния морских акваторий средствами дистанционного зондирования / А.И. Алексанин, В.А. Качур, Т.Ю. Орлова, А.Н. Павлов, П.А. Салюк // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7. – № 3. – С. 131–138.
51. Онлайн-камеры на вулканах Камчатки // CamDV онлайн-камеры и трансляции на Дальнем Востоке. URL: <http://camdv.ru/city/12/> (дата обращения: 11.03.2016).
52. Наземный комплекс приема, обработки, архивации и распространения спутниковой информации Росгидромета // Сайт ФГБУ НИЦ «Планета», Москва, Россия. URL: <http://http://planet.rssi.ru/index31.html> (дата обращения: 11.03.2016).
53. Сектор инструментального мониторинга среды // Сайт СахНИРО. URL: http://www.sakhniro.ru/page/sector_environmental_monitoring/ (дата обращения: 11.03.2016).
54. Кошкарев А.В., Ряховский В.М., Серебряков В.А. Инфраструктура распределенной среды хранения, поиска и преобразования пространственных данных // Открытое образование. – 2010. – № 5. – С. 61–72.
55. Горобцов С.Р., Подрядчикова Е.Д. Сравнительный анализ современного российского опыта геопортальных решений для целей муниципального управления // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2014. – Т. 3. – № 2. – С. 150–158.
56. Дубровский А.В. Возможности применения геоинформационного анализа в решении задач мониторинга и моделирования пространственных структур // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 5. – С. 236–242.
57. Copernicus: Sentinel-1 – The SAR Imaging Constellation for Land and Ocean Services // Sharing Earth Observation Recourses. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/sentinel1> (дата обращения: 12.03.2016).

58. China Integrated Earth Observation System (2016–2025) // China GEO 2025 Expert Group. Sept. 9, 2015. URL: <http://tinyurl.com/z2814f9> (дата обращения: 11.03.2016).
59. Earth Observation Satellites // Canadian Space Agency. URL: <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/default.asp> (дата обращения: 11.03.2016).
60. Iannotta B. SPOT Image plans strategy of efficiency // Space News. – 1999. – V. 10. – № 38. – P. 16.
61. Observing the Earth // Space for Europe. URL: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth (дата обращения: 11.03.2016).
62. Programme on Space Applications // United Nations Office for Outer Space Affairs. URL: http://www.unoosa.org/pdf/publications/ST_SPACE_52_Rev1.pdf (дата обращения: 12.06.2016).
63. Sentinel 3A, 3B, 3C, 3D // Gunter's Space Page. URL: http://space.skyrocket.de/doc_sdat/sentinel-3.htm (дата обращения: 12.03.2016).
64. The Suomi-NPP (National Polar-orbiting Partnership) // National Aeronautics and Space Administration. URL: <https://jointmission.gsfc.nasa.gov/suomi.html> (дата обращения: 12.03.2016).
65. Mohamed A.E. Abdel Rahman, Natarajan A., Srinivasamurthy C.A., Rajendra Hegde. Estimating soil fertility status in physically degraded land using GIS and remote sensing techniques in Chamarajanagar district, Karnataka, India // Египт. J. Remote Sensing Space Sci. – 2016. – № 2. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.12.002> (дата обращения: 12.03.2016).
66. Lillesand T., Kiefer R.W., Chipman J. Remote sensing and image interpretation. Seventh Edition. – New York: John Wiley & Sons, 2015. – 768 p.
67. Experimental Sentinel-2 LAI estimation using parametric, non-parametric and physical retrieval methods – a comparison / J. Verrelst, J.P. Rivera, F. Veroustraete, J. Muñoz-Mari, J.G. Clevers, G. Camps-Valls, J. Moreno // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2015. – V. 108. – P. 260–272.
68. Whitcraft A.K., Becker-Reshef I., Justice C.O. A framework for defining spatially explicit Earth Observation requirements for a global agricultural monitoring initiative (GEOGLAM) // Remote Sensing. – 2015. – V 7. – № 2. – P. 1461–1481.
69. Kumar S., Radhakrishnan N., Mathew S. Land use change modeling using a Markov model and remote sensing // Geomatics. Natural Hazards and Risk. – 2014. – V. 5. – № 2. – P. 145–156.
70. A Markov Chain Model of Land Use Change / M. Iacono, D. Levinson, A. El-Geneidy, R. Wasfi // TeMA Journal of Land Use, Mobility and Environment. – 2015. – V. 8. – № 3. – P. 263–276.

Поступила 06.04.2016 г.

Информация об авторах

Верхотуров А.А., старший преподаватель кафедры геологии и природопользования Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета.

Мелкий В.А., доктор технических наук, заведующий кафедрой геологии и природопользования, директор Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета.

UDC 528.88: 528.856: 502.065

DEVELOPMENT OF LAND REGIONAL MONITORING SYSTEMS BASED ON ATLAS MAPPING

Aleksey A. Verkhoturov¹,
ussr-91@mail.ru

Vyacheslav A. Melkiy¹,
vamelkiy@mail.ru

¹ Sakhalin State University,
42, Pogranichnaya street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia.

The relevance of the work is caused by the fact that evaluation of the current status of land, determining the character of changes in the components of natural systems, prediction of activation of the negative processes of changing landscapes and all components of ecosystems, are not possible without high-quality data that can be obtained only through the well-organized monitoring systems at the regional level.

The aim of the research is to analyze the possibilities of systems for environmental monitoring; to find out the correlations of the external manifestations in the relief of internal natural processes and their causes; to define the indicators of processes orientation; to develop the recommendations to optimize the functioning of regional systems of monitoring based on atlas geographic information system (GIS) mapping.

Research methods. The authors have carried out the analysis of technical capabilities of the receiving stations of satellite data from the TERRA spacecraft, Landsat, NOAA and others at the regional level in Sakhalin region. When carrying out the researches the authors used the methods of mathematical and geospatial mapping, statistical, complex physical-geographical, spatial analysis, thematic interpretation, etc.

Results. The authors developed the recommendations on organizing the monitoring system of Sakhalin region and defined its composition and technical equipment. It was proposed to solve the problems of a certain scale for regional land monitoring, based on GIS mapping and data of remote sensing of the Earth performed with certain frequency of observations. The system of regional monitoring, which is able to increase the efficiency and effectiveness of its holding in Sakhalin region through cooperation and coordinated activities of all participants, was recommended.

Conclusions. The authors developed the theory and laid the methodological basis of the system of atlas geoinformation mapping of the territory of Sakhalin region, on the basis of which it is possible to organize a comprehensive land monitoring in the region using existing geoportals, and at the best applying the newly created special geoportal. The satellite data should be accepted by the ground receiving stations, located in the region.

Key words:

Land monitoring, GIS mapping, land resources inventory, satellite imagery, environmental protection, geoportal, chart atlas.

REFERENCES

1. Vernadskiy V.I. Razmyshleniya naturalista [Thoughts of naturalist]. *Prostranstvo i vremya v nezhyvov i zhivoy prirode* [Space and time in animate and inanimate nature]. Moscow, Nauka Publ., 1975. B. 1, 173 p.
2. «Zemelnyy kodeks Rossiyskoy Federatsii» ot 25.10.2001 № 136-FZ (redaktsiya ot 30.12.2015) (s izmeneniyami i dopolneniyami, vstupil v silu s 01.01.2016). [«The land code of the Russian Federation» of 25.10.2001 no. 136-Federal Law (as amended on 30.12.2015) (with amendments and additions, in force from 01.01.2016)]. Available at: <http://legalacts.ru/kodeks/ZK-RF/> (accessed 10 March 2016).
3. Stockholm Declaration on the Human Environment. *Report of the United Nations Conference on the Human Environment*. UN Doc.A/CONF.48/14, at 2 and Corr.1 (1972).
4. Volkov S.N. *Opyit zemleustroystva na zemlyakh selskokhozyaystvennogo naznacheniya v SShA i Kanade* [Experience of land management on agricultural lands in the United States and Canada]. Moscow, State Univ. of Land management Press, 2012. 44 p.
5. Emmelin L., Cherp A. National environmental objectives in Sweden: a critical reflection. *Journal of Cleaner Production*, 1 June 2016, vol. 123, pp. 194–199.
6. Paule-Mercado M.A., Ventura J.S., Memon S.A., Jahng D., Kang J.-H., Lee C.-H. Monitoring and predicting the fecal indicator bacteria concentrations from agricultural, mixed land use and urban stormwater runoff. *Science of the Total Environment*, 15 April 2016, vol. 550, pp. 1171–1181.
7. Postanovlenie Soveta ministrov – Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 24 noyabrya 1993 goda № 1229 «O sozdanii Edinoy gosudarstvennoy sistemy ekologicheskogo monitoringa» [The Decree of Council of Ministers – The Government of the Russian Federation of 24 November 1993 no. 1229 «On creation of the Unified state system of environmental monitoring»]. *Sobranie aktov Prezidenta i Pravitelstva RF* [Collection of Acts of the President and the Government of the Russian Federation], 29.11.1993, no. 48, article 4661. Available at: <http://base.garant.ru/2108166/> (accessed 10 March 2016).
8. *Polozhenie o gosudarstvennom ekologicheskom monitoringe (gosudarstvennom monitoringe okruzhayushchey sredy) i gosudarstvennom fonde dannykh gosudarstvennogo ekologicheskogo monitoringa (gosudarstvennogo monitoringa okruzhayushchey sredy) (s izmeneniyami na 10 iyulya 2014 goda)* [The regulation on State environmental monitoring (State environmental monitoring) and State Fund of data of State environmental monitoring (amended on 10 July 2014)]. Available at: <http://standartgost.ru/g/pkey-14293779851> (accessed 10 March 2016).
9. Postanovlenie Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 9 avgusta 2013 goda № 681 «O gosudarstvennom ekologicheskom monitoringe (gosudarstvennom monitoringe okruzhayushchey sredy) i gosudarstvennom fonde dannykh gosudarstvennogo ekologicheskogo monitoringa (gosudarstvennogo monitoringa okruzhayushchey sredy)» [The Decree of the Government of the Russian Federation from 9 August 2013 no. 681 «About State Ecological monitoring (State environmental monitoring) and State Fund of data of State environmental monitoring»]. *Sobranie zakonodatelstva*

- Rossiyskoy Federatsii [Collection of Acts of the President and the Government of the Russian Federation], № 14, 07.04.2003.
10. Savinykh V.P. Information support of Scientific and Applied studies based on Space information. *Perspectives of science and education*, 2015, no. 2 (14), pp. 51–59. In Rus.
 11. Bondur V.G., Zverev A.T. Mekhanizmy formirovaniya lineamentov, registriruemyykh na kosmicheskikh izobrazheniyakh pri monitoringe seysmopasnykh territoriy [Mechanisms of forming lineaments detected on space images for monitoring earthquake-prone areas]. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics Earth Observation and Remote Sensing*, 2007, no. 1, pp. 47–56.
 12. Bondur V.G., Krapivin V.F., Savinykh V.P. *Monitoring i prognozirovanie prirodnykh katastrof* [Monitoring and forecasting of Natural disasters]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2009. 692 p.
 13. Qianguo Xing, Ruolin Meng, Mingjing Lou, Lei Bing, Xin Liu. Remote Sensing of Ships and Offshore Oil Platforms and Mapping the Marine Oil Spill Risk Source in the Bohai Sea. *Aquatic Procedia*, March 2015, vol. 3, pp. 127–132.
 14. Pisoni J.P., Rivas A.L., Piola A.R. Satellite remote sensing reveals coastal upwelling events in the San Matías Gulf–Northern Patagonia. *Remote Sensing of Environment*, September 2014, vol. 152, pp. 270–278.
 15. Malinnikov V.A. *Teoriya i metody informatsionnogo obespecheniya monitoringa zemel. Tematicheskaya obrabotka videoizobrazheniy*. Dis. Dokt. nauk [Theory and methods of information support of land monitoring: Thematic processing of video images. Dr. Diss.]. Moscow, 1999. 351 p.
 16. Reath K.A., Ramsey M.S., Dehn J., Webley P.W. Predicting eruptions from precursory activity using remote sensing data hybridization. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 15 July 2016, vol. 321, pp. 18–30.
 17. Melkiy V.A., Chernigovskiy Yu.M., Dolgoplov D.V., Marchukov V.S. Prognozirovanie vzyvnykh vulkanicheskikh izverzheniy po dannym distantsionnogo zondirovaniya [Forecasting of Explosive volcanic Eruptions by Remote Sensing data]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka*, 1998, no. 3, pp. 123–129.
 18. Melkiy V.A., Ferberova L.V. Razrabotka metodiki avtomatizirovannogo deshifirovaniya opustynnykh territoriy po aerokosmicheskim izobrazheniyam [Development of Technique for Automated interpretation decertified areas by aerospace images]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka*, 1998, no. 6, pp. 130–144.
 19. Melkiy V.A., Marchukov V.S., Shitikova M.V. Monitoring seysmicheskoy opasnosti Altaysko-Sayanskoy skladchatoy zony po dannym distantsionnogo zondirovaniya [The Seismic activity Monitoring in the Altai-Sayan folded area by Remote sensing]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka*, 1999, no. 3, pp. 107–118.
 20. Sadv A.V. *Aerokosmicheskie metody v inzhenernoy geodinamike* [Aerospace methods in engineering geodynamics]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 206 p.
 21. Lebedev P.P., Sizov A.P. Mapping component of the Monitoring system of Urban land. *Geography and Natural Resources*, 2012, no. 4, pp. 150–154. In Rus.
 22. Sizov A.P. *Ekologicheskie osnovy zemlepolzovaniya v sverkhkrupnom gorode* [Ecological basis of Land use in Mega City]. Moscow, Rusayns Publ., 2015. 120 p.
 23. Liu Ting, Yang Xiaojun. Monitoring land changes in an urban area using satellite imagery, GIS and landscape metrics. *Applied Geography*, January 2015, vol. 56, pp. 42–54.
 24. Garbuk S.V., Gershenzon V.E. *Kosmicheskie sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli* [Space systems of the Earth remote sensing]. Moscow, A and B Publ., 1997. 296 p.
 25. Krinov E.L. *Spektralnaya otrazhatelnaya sposobnost prirodnykh obrazovaniy* [Spectral reflectivity of natural formations]. Moscow; Leningrad, Academy of Science of the USSR Press, 1947. 272 p.
 26. Kronberg P. *Distantsionnoe izuchenie Zemli: Osnovy i metody distantsionnykh issledovaniy v geologii* [Remote study of the Earth: Framework and methods for Remote studies in Geology]. Moscow, Mir Publ., 1988. 349 p.
 27. Zverev A.T., Gavrilova V.V. Development of Theory and Methods for assessing and forecasting the conditions of natural resources with using satellite images. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka*, 2012, no. 5, pp. 44–47. In Rus.
 28. Sladkoptevsev S.A. *Dostizheniya i problemy geomorfologii, kartografii, geoekologii i prikladnoy kosmonavtiki* [Achievements and problems of Geomorphology, Cartography, Geoecology and Applied cosmonautics]. Moscow, MIIGAIK Publ., 2013. 199 p.
 29. Barboux Ch., Strozzi T., Delaloye R., Wegmüller U., Collet C. Mapping slope movements in Alpine environments using TerraSAR-X interferometric methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, November 2015, vol. 109, pp. 178–192.
 30. Vereshchaka T.V., Kachaev G.A. Topograficheskie karty v sisteme ekodiagnostiki territorii: otsenka informativnosti prirodnykh obektov [Topographic maps in the System of ecodiagnostic territory: estimation of the informative value of Natural objects]. *Geodeziya i kartografiya*, 2011, no. 10, pp. 14–19.
 31. Ataev Z.V., Bratkov V.V. Dynamics of residential development of the Landscape of emerging Makhachkala-Caspian agglomeration (based on remote sensing data). *Monitoring. Science and technology*, 2013, no. 4, pp. 11–16. In Rus.
 32. Balguez T.R., Bratkov V.V. Evaluation of intra-annual variability of the Territory of the Tyuleni island (by remote sensing materials). *Monitoring. Science and technology*, 2015, no. 1, pp. 44–51. In Rus.
 33. Bratkov V.V., Zaurbekov Sh.Sh., Klyushin P.V., Marin A.N. Distantsionnoe zondirovanie territorii Severnogo Kavkaza [Remote sensing of the Territory of the North Caucasus]. *Zemleustroystvo, kadastr i monitoring zemel*, 2011, no. 4 (76), pp. 69–80.
 34. García-Llamas Paula, Calvo Leonor, Álvarez-Martínez José Manuel, Suárez-Seoane Susana. Using remote sensing products to classify landscape. A multi-spatial resolution approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, August 2016, vol. 50, pp. 95–105.
 35. Marcantonio Matteo, Pareeth Sajid, Rocchini Duccio, Metz Markus, Garzon-Lopez Carol X., Neteler Markus. The integration of Artificial Night-Time Lights in landscape ecology: a remote sensing approach. *Ecological Complexity*, June 2015, vol. 22, pp. 109–120.
 36. Martínez del Castillo Edurne, García-Martín Alberto, Aladrén Luis Alberto Longares, Luis Martín. Evaluation of forest cover change using remote sensing techniques and landscape metrics in Moncayo Natural Park (Spain). *Applied Geography*, August 2015, vol. 62, pp. 247–255.
 37. Knizhnikov Yu.F., Kravtsova V.I. Tematicheskoe deshifirovanie mnogozonalnykh kosmicheskikh snimkov [Thematic decoding of multispectral satellite images]. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics Earth Observation and Remote Sensing*, 1980, no. 1, pp. 88–94.
 38. Kronberg P. Zur geologischen auswertung von luftbildern [For the purposes of geological interpretation of aerial images]. *Photogrammetria*, December 1969, vol. 25, Iss. 2–3, pp. 75–85.
 39. Bartalev S.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Lupyán E.A. Osnovnye zadachi i perspektivy sozdaniya sistemy globalnogo sputnikovogo monitoringa lesov [Main tasks and prospects of creation of the system of global satellite monitoring of forests]. *Contemporary Problems of Ecology Russian Forest Sciences*, 2011, no. 6, pp. 3–15.
 40. Bartalev S.A., Lupyán E.A. Research and development of ISR RAS on development of methods for satellite monitoring of vegetation cover. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, vol. 10, no. 1, pp. 197–214. In Rus.
 41. Rahman Naima, Ansary Mehedi A., Islam Ishrat. GIS based mapping of vulnerability to earthquake and fire hazard in Dhaka city,

- Bangladesh. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, September 2015, vol. 13, pp. 291–300.
42. El Baroudy A.A. Mapping and evaluating land suitability using a GIS-based model. *CATENA*, May 2016, vol. 140, pp. 96–104.
 43. Brovko P.F., Malyugin A.V., Terentev N.S., Khrumushin V.N. Geomorfologicheskii monitoring lagunnykh beregov Sakhalina [Geomorphological monitoring of lagoon coast of Sakhalin]. *Morskoye i morskoe nauki: izbrannyye doklady 4 Sakhalinskoy regionalnoy morskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Seafaring & Marine science: selected papers of the 4th Sakhalin regional Marine scientific and technical Conference]. Yuzhno-Sakhalinsk, Sakhalinskaya oblastnaya tipografiya, 2013. pp. 133–142.
 44. Grannik V.M., Rybin A.V., Piskunov B.N., Chibisova M.V. Vulkanologicheskoye issledovaniya na Kurilskikh ostrovakh: itogi i perspektivy [Volcanological research in the Kuril Islands: results and prospects]. *Vestnik Dalnevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk*, 2011, no. 6 (160), pp. 13–18.
 45. Rybin A.V., Chibisova M.V., Koroteev I.G. Problemy monitoringa vulkanicheskoy aktivnosti na Kurilskikh ostrovakh [Problems of Monitoring volcanic activity in the Kuril Islands]. *Vestnik Dalnevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk*, 2010, no. 3, pp. 64–71.
 46. Gordeev E.I., Girina O.A. Volcanoes and their hazard to aviation. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2014, vol. 84, no. 2, pp. 134–142. In Rus.
 47. Kirianov V.Yu. Volcanic Ash in Kamchatka as a Source of Potential Hazard to Air Traffic. *Volcanic Ash and Aviation Safety: Proc. First Intern. Symp. on Volcanic Ash and Aviation safety. US Geological Survey Bull.*, 1992, vol. 2047, pp. 57–63.
 48. Girina O.A., Gordeev E.I. Proekt KVERT – snizhenie vulkanicheskoy opasnosti dlya aviatsii pri eksplozivnykh izverzheniyakh vulkanov Kamchatki i Severnykh Kuril [The KVERT project is the reduction of volcanic hazard for aircraft during explosive eruptions of Kamchatka and North Kuriles]. *Vestnik Dalnevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk*, 2007, no. 2, pp. 100–109.
 49. Kirianov V.Yu., Neal Ch.A., Gordeev E., Miller T.P., Hendley J.W. II, Stauffer P. *The Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team (KVERT) Fact Sheet 064–02*. Available at: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/fs06402/> (accessed 11 March 2016).
 50. Aleksanin A.I., Kachur V.A., Orlova T.Yu., Pavlov A.N., Salyuk P.A. Organizatsiya issledovaniy po otsenke ekologicheskogo sostoyaniya morskikh akvatoriy sredstvami distantsionnogo zondirovaniya [Organization of studies to assess the ecological status of marine waters by remote sensing instruments]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, vol. 7, no. 3, pp. 131–138.
 51. Onlayn kamery na vulkanakh Kamchatki [Online camera on the volcanoes of Kamchatka]. *CamDV. Onlayn kamery i translyatsii na Dalnem Vostoke* [Online camera and broadcast in the far East]. Available at: <http://camdv.ru/city/12/> (accessed 11 March 2016).
 52. Nazemnyy kompleks priema, obrabotki, arkhivatsii i rasprostraneniya sputnikovoy informatsii Rosgidrometa [The ground complex for receiving, processing, archiving and distributing satellite data of Roshydromet]. *Sayt FGBU NITS «Planeta»*. Available at: <http://planet.rssi.ru/index31.html> (accessed 11 March 2016).
 53. *Sektor instrumentalnogo monitoringa sredey* [Sector of instrumental monitoring of environment]. *SakhNIRO*. Available at: http://www.sakhniro.ru/page/sector_environmental_monitoring/ (accessed 11 March 2016).
 54. Koshkarev A.V., Ryakhovskiy V.M., Serebryakov V.A. Infrastruktura raspredelennoy sredey khraneniya, poiska i preobrazovaniya prostranstvennykh dannykh [Infrastructure of the distributed environment for storage, retrieval and transformation of spatial data]. *Otkrytoe obrazovanie*, 2010, no. 5, pp. 61–72.
 55. Gorobtsov S.R., Podryadchikova E.D. Comparative analysis of modern Russian experience in geoportals solutions for the purposes of Municipal management. *Interesko Geo-Sibir*, 2014, vol. 3, no. 2, pp. 150–158. In Rus.
 56. Dubrovskiy A.V. Possibility of applying GIS analysis in monitoring and modeling spatial structures. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka*, 2015, no. S5, pp. 236–242. In Rus.
 57. Copernicus: Sentinel-1 – The SAR Imaging Constellation for Land and Ocean Services. *Sharing Earth Observation Recourses*. Available at: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/sentinel1> (accessed 11 March 2016).
 58. China Integrated Earth Observation System (2016–2025). *China GEO 2025 Expert Group*. Sept. 9, 2015. Available at: <http://tinyurl.com/z2814f9> (accessed 11 March 2016).
 59. Earth Observation Satellites. *Canadian Space Agency*. Available at: <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/default.asp> (accessed 11 March 2016).
 60. Iannotta B. SPOT Image plans strategy of efficiency. *Space News*, 1999, vol. 10, no. 38, P. 16.
 61. Observing the Earth. *Space for Europe*. Available at: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth (accessed 12 March 2016).
 62. Programme on Space Applications. *United Nations Office for Outer Space Affairs*. Available at: http://www.unoosa.org/pdf/publications/ST_SPACE_52_Rev1.pdf (accessed 12 March 2016).
 63. Sentinel 3A, 3B, 3C, 3D // Gunter's Space Page. Available at: http://space.skyrocket.de/doc_sdat/sentinel-3.htm (accessed 12 March 2016).
 64. The Suomi-NPP (National Polar-orbiting Partnership) // National Aeronautics and Space Administration. URL: <https://joint-mission.gsfc.nasa.gov/suomi.html> (accessed 12 March 2016).
 65. Mohamed A.E. Abdel Rahman, Natarajan A., Srinivasamurthy C.A., Rajendra Hegde. Estimating soil fertility status in physically degraded land using GIS and remote sensing techniques in Chamarajanagar district, Karnataka, India. *Egypt. J. Remote Sensing Space Sci.*, 2016, no. 2. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.12.002> (accessed 12 March 2016).
 66. Lillesand T., Kiefer R.W., Chipman J. *Remote sensing and image interpretation*. Seventh Edition. New York, John Wiley & Sons, 2015. 768 p.
 67. Verrelst J., Rivera J.P., Veroustraete F., Muñoz-Mari J., Clevers J.G., Camps-Valls G., Moreno J. Experimental Sentinel-2 LAI estimation using parametric, non-parametric and physical retrieval methods – a comparison. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, vol. 108, pp. 260–272.
 68. Whitcraft A.K., Becker-Reshef I., Justice C. O. A framework for defining spatially explicit Earth Observation requirements for a global agricultural monitoring initiative (GEOGLAM). *Remote Sensing*, 2015, vol. 7, no. 2, pp. 1461–1481.
 69. Kumar S., Radhakrishnan N., Mathew S. Land use change modeling using a Markov model and remote sensing. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2014, vol. 5, no. 2, pp. 145–156.
 70. Iacono M., Levinson D., El-Geneidy A., Wasfi R. A Markov Chain Model of Land Use Change. *TeMA Journal of Land Use, Mobility and Environment*, 2015, vol. 8, no. 3, pp. 263–276.

Received: 6 April 2016.

Information about the authors

Aleksey A. Verkhoturov, Senior lecturer, Sakhalin State University.

Vyacheslav A. Melkiy, Dr. Sc., head of the department, director of Oil and Gas Technical Institute, Sakhalin State University.

УДК 532:536

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕПАРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ УГЛЕВОДОРОДНЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ В РЕЖИМАХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ НЕФТИ

Николаев Евгений Владимирович¹,
nickolaev_evgeny@mail.ru

Харламов Сергей Николаевич¹,
kharsn@mail.ru

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

Методики управления сепарацией в реологически сложных углеводородных средах, опирающиеся на современные многопараметрические модели, являются актуальными и составляют базу для получения ценной эмпирической информации о течениях многокомпонентных вязких сред. Поэтому исследования, связанные с прогнозированием явлений и закономерностей сепарации, являются актуальным и практически значимым.

Цель работы: выявление закономерностей процесса сепарации в углеводородных средах; рекомендации в практику прикладных расчетов компонентного состава сложных гомогенных систем в следующем диапазоне изменений термобарических условий – температуры $T \approx 0-70$ °С и давления $P \approx 50-700$ кПа.

Методы исследования: термодинамические модели в программном комплексе Aspen HYSYS: уравнение состояния Пенга–Робинсона, уравнение состояния Ли–Кеслера–Плокера, уравнение NRTL, полуэмпирическая модель Грейсона–Стрида; статистическая механика (метод Чепмена–Энскога); соответственные состояния (метод Голубева); теория подобия.

Результаты. Проведены исследования особенностей моделирования процесса сепарации в углеводородных средах, в рамках термодинамики равновесных состояний. Обсуждены подходы к расчету фазового равновесия многокомпонентных систем. Изучены закономерности и особенности изменений состава смеси выходящего потока газа в отдельных режимах изменений поля температуры и давления, характерных для функционирования промышленных устройств. Показано, что для некоторых режимов сепарации формируются условия для немоногомного изменения состава с экстремальными значениями, которые заметно влияют на физические свойства и интенсивность обменных процессов переноса тепла и массы в многокомпонентных углеводородных средах. Произведен расчет теплофизических свойств смеси газа по различным методам, результаты которого сравнивались как с экспериментальными данными, так и с данными, полученными с помощью программного комплекса HYSYS.

Ключевые слова:

Многокомпонентная система, углеводородная среда, сепарация, моделирование, термодинамика, теплофизические свойства.

Введение

Эффективное прогнозирование процессов разделения является важной частью задач проектирования и эксплуатации оборудования для многоступенчатой сепарации нефти. В настоящее время существует большое количество эмпирических уравнений с различной степенью точности, позволяющих прогнозировать термодинамические процессы в углеводородных средах. Известно [1], что в практике прикладных расчетов состава вязких систем очень популярны модели с многокоэффициентными, а также полиномиальными связями между искомыми параметрами. В частности, наиболее удобными, относительно простыми и корректными, в сравнении с имеющимися опытными данными, являются полиномиальные уравнения состояния. Чувствительные к реальным возмущениям в рабочем процессе, они прогнозируют свойства «чистых» веществ и смесей с большей надежностью в сравнении с моделями, включающими многокоэффициентные уравнения состояния. Стоит заметить, что отдельный анализ достоинств методик определения свойств углеводородных сред по указанным уравнениям, представленный в [1], показывает, что проблемы прогноза механизмов

разделения в смесях еще далеки от разрешения и требуются их детальные исследования особенно в части эволюции структуры веществ в режимах интенсификации массо- и теплопереноса.

Исследования по данной тематике достаточно полно представлены в [2–4]. Так, в [2, 3] с помощью компьютерного моделирования проводилось исследование многоступенчатой сепарации при предварительной подготовке нефти. Получена экономия уноса тяжелых углеводородов с отгоняемым газом путем оптимизации термобарических условий. Установлено [2], что оптимизация термобарических условий позволяет сократить унос в первом сепараторе до 40 %, особенно в зонах интенсивного выделения газа, а также получить дополнительно 3 кг нефти на одну тонну. В [4] были приведены отдельные результаты эволюции компонентного состава выходящего потока газа при сепарации углеводородных сред в широком диапазоне изменений термобарических условий.

Задача оптимизации технологического режима сепарации для конкретного компонентного состава скважинной продукции является сложной. Одни только нерационально подобранные термобарические условия сепарации при подготовке нефти

могут привести к ощутимым потерям ценных тяжелых углеводородов с отгоняемым газом. Этой задаче также были посвящены работы [5–8].

Отметим, что в характеристике локальных явлений в смесях важным является представление о распределениях теплофизических свойств. При их определении в многокомпонентных углеводородных средах применение правила аддитивности может привести к значительным погрешностям. Поэтому в исследовании таких систем, в силу сложного нелинейного их изменения, целесообразны методы статистической механики, основанные на кинетической теории Чепмена–Энскога, или методы соответственных состояний на базе эмпирических данных. Теоретические и экспериментальные подходы к вычислению теплофизических свойств углеводородных сред приводятся в ряде современных исследований [9–15]. В частности, в [15] представлен код программного пакета CHEMEKIN на базе теории Чепмена–Энскога для прогноза ряда теплофизических свойств многокомпонентных газовых сред (коэффициента динамической вязкости, коэффициента теплопроводности, коэффициента диффузии, коэффициента термодиффузии и т. д.).

Библиографический анализ показывает [1–23], что в настоящее время актуально направление, связанное с влиянием скрещивающихся эффектов диффузии, например, термодиффузии на явления переноса вещества. Из последних исследований (в частности, [16–23]) детальных механизмов в диффузионных процессах в рамках уравнений Онзагера в пористых средах видно, что при малых числах Пекле эффективный коэффициент термодиффузии в пористых и открытых системах одинаковый, а при конвективном переносе теплоты эффект термодиффузии уменьшается. В таком случае изменение коэффициента пористости оказывает влияние на эффективный коэффициент термодиффузии, а также на коэффициент теплопроводности. В [20] представлены обширные сведения о достоинствах экспериментальных подходов к исследованию термодиффузии, рассмотрены и обсуждены два типа методов: оптические и неоптические. В [21] с помощью оптического цифрового метода интерферометрии получены результаты измерений коэффициента термодиффузии, согласующиеся с эталонными данными в пределах допустимых отклонений. В [22] обсуждаются результаты вклада в процессы переноса массы вещества механизмов термической диффузии (эффекта Соре), методов его теоретического и экспериментального учета. В [23] разработана модель, предсказывающая значения и знаки коэффициентов термодиффузии отдельных компонентов для четырехкомпонентных систем, на базе неравновесного термодинамического подхода. Отмечается, что в многокомпонентных смесях (с составом 4 и более компонентов) прогноз влияния данного эффекта будет более сложным.

С учётом сказанного в настоящей работе поставлены следующие цели: произвести расчет тепло-

физических свойств выходящего потока газовой смеси и оценить по полученным значениям критерии подобия, такие как числа Прандтля, Шмидта и Льюиса, важные при тройной аналогии; уяснить закономерности процесса сепарации в углеводородных средах в рамках равновесной термодинамики; выдать рекомендации в практику прикладных расчетов компонентного состава при сепарации многокомпонентных углеводородных сред в диапазоне следующих изменений термобарических условий: температуры $T \cong 0-70$ °С и давления $P \cong 50-700$ кПа.

Особенности при моделировании процессов сепарации углеводородных сред

Особенности коммерческих кодов в прогнозе фазовых процессов. В настоящее время в практике прикладных исследований многомерных и многопараметрических, равновесных и неравновесных термодинамических процессов в реологически сложных средах, включающих переходы вихревой, тепловой и химической природы, очень популярны программные пакеты типа ANSYS CFX, FLUENT, HYSYS, которые представляют собой сложную интегрированную систему для моделирования разнообразных явлений в природе и технике. В частности, достоинства коммерческого кода HYSYS фирмы Huprotech в прогнозах процессов в гомогенных и гетерогенных средах с последующей визуализацией деталей достаточно известны [24, 25].

Как интегрированная среда программный продукт HYSYS позволяет осуществлять эффективный контроль за динамическими и стационарными режимами функционирования систем, при моделировании которых используются одни и те же термодинамические модели. Целый ряд существенных компонентов, которые входят в код HYSYS, делают его мощным инструментом моделирования режимов работы технологических схем. Сюда стоит отнести весьма обширный класс моделируемых технологических операций и большое количество методов расчета фазового равновесия и свойств среды. Эти особенности кода позволяют надежно рассчитывать широкий класс задач по управлению технологическими объектами [25]. Так, для углеводородных сред рекомендуется использовать уравнение состояния Пенга–Робинсона [26]. Оно является модификацией уравнения Ван дер Ваальса и было предложено Д. Робинсоном и его учеником Д. Пенгом в 1976 г. в Альбертском университете с целью удовлетворения следующих потребностей:

- 1) параметры системы должны быть выражены через критические свойства и ацентрический фактор;
- 2) модель должна обеспечить достаточную точность вблизи критической точки, в частности для расчетов коэффициента сжимаемости и плотности жидкости;
- 3) правила смешивания не должны использовать более одного двоичного параметра взаимодей-

ствия, которые должны быть независимы от давления, температуры и состава;

- 4) уравнение должно быть применимо ко всем расчетам всех свойств жидкости в природных процессах газа [26].

В своем термическом виде уравнение сводится к формулировке

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v(v-b)+b(v-b)} \quad (1)$$

и в полиномиальной (кубической) форме широко используется в практике:

$$Z^3 + (B-1)Z^2 + (A-2B-3B^2)Z + (B^2+B^3-AB) = 0. \quad (2)$$

Здесь P – давление, Па; T – температура, К; v – молярный объём, м³/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); A , B – коэффициенты уравнения; a , b – коэффициенты уравнений вандерваальсового типа, м³/моль; Z – коэффициент сжимаемости.

Заметим, что усовершенствованное фирмой Нупротек уравнение состояния (1) наиболее точно описывает разнообразные системы в широком диапазоне термобарических условий в сравнении с другими аналогичными уравнениями. Поэтому многие специалисты используют именно это уравнение состояния в исследованиях открытых термодинамических систем [5, 27–29].

Метод расчета фазового равновесия по уравнению состояния наиболее удобен, так как уравнение в компактной аналитической форме содержит максимальную информацию о данной системе. К тому же расчет фазового равновесия с использованием уравнений состояния основан на корректном применении классических аспектов термодинамики многокомпонентных систем – равнозначности летучестей компонента смеси во всех сосуществующих фазах [1, 26].

Первое приближение при моделировании фазового равновесия многокомпонентных систем «пар–жидкость». Расчет фазового равновесия пар–жидкость определяет компонентные составы обеих фаз в требуемой точке (P – T)-фазовой диаграммы. Известными считаются: z_i – мольные доли всех N компонентов смеси, а также давление P и температура T системы.

Коэффициентом распределения K_i (или константой фазового равновесия i -го компонента углеводородной смеси) называют отношение мольной доли этого компонента в паровой фазе (y_i) к его мольной доле в жидкой фазе (x_i):

$$K_i = \frac{y_i}{x_i}. \quad (3)$$

Предположим, что паровая фаза подчиняется законам идеальных газов, а жидкая фаза является идеальным раствором. Тогда выполняется объединенный закон Дальтона–Рауля [1]:

$$y_i P = x_i P_{si}(T), \quad (4)$$

где $P_{si}(T)$ – давление насыщенного пара чистого i -го вещества при заданной температуре, Па.

С учетом определения (3) из (4) получается следующая зависимость для константы фазового равновесия i -го компонента смеси:

$$K_i = \frac{P_{si}(T)}{P}. \quad (5)$$

Видно, что при принятых допущениях константа фазового равновесия зависит только от общего давления системы и давления насыщенного пара i -го компонента при заданной температуре T . Давление насыщенного пара компонента i может быть найдено по формуле Вильсона [30]:

$$P_{si}(T) = P_{ci} e^{5,373(1+\omega_i)\left(1-\frac{T_{ci}}{T}\right)}, \quad (6)$$

где T_{ci} – критическая температура i -го компонента, К; P_{ci} – критическое давление i -го компонента, Па; ω_i – ацентрический фактор i -го компонента.

Заметим, что давление насыщенного пара имеет физический смысл при температуре ниже критической. Поэтому выражение для P_{si} при $T > T_{ci}$ в (6) рассматривают как формальную экстраполяцию. Подставив формулу Вильсона (6) в уравнение (5), можно рассчитать идеальные константы фазового равновесия. Они применяются в качестве начальных приближений констант фазового равновесия при решении задач расчета парожидкостного равновесия многокомпонентных систем. Однако результаты [31] показывают, что углеводородная среда в пределах давлений до 1,0 МПа подчиняется законам идеального раствора и, рассчитывая давления насыщенных паров по уравнению Антуана, можно получить достаточно точные результаты, не прибегая к применению уравнений состояния. Расчет давления насыщенного пара по уравнению Антуана имеет вид [32]:

$$P_{si} = e^{A_i - \frac{B_i}{T+C_i}}, \quad (7)$$

где A_i , B_i , C_i – коэффициенты Антуана, характерные для каждого углеводорода в определенных пределах температуры.

Пусть мольная доля паровой фазы равна V , а жидкой фазы – L . Тогда запишем уравнение материального баланса для i -го компонента смеси:

$$z_i = y_i V + x_i L. \quad (8)$$

Поскольку $V+L=1$, то заменим в уравнении (8) L на $(1-V)$. Кроме того, учтем определение (3) и заменим y_i на произведение $K_i x_i$. Тогда из (8) получим:

$$x_i = \frac{z_i}{V(K_i - 1) + 1}, \quad (9)$$

$$y_i = \frac{z_i K_i}{V(K_i - 1) + 1}. \quad (10)$$

Уравнения (9) и (10) называют уравнениями фазовых концентраций компонентов смеси. Поскольку $\sum_{i=1}^N x_i = 1$ и $\sum_{i=1}^N y_i = 1$, то $\sum_{i=1}^N (y_i - x_i) = 0$, и с учетом выражений (9) и (10) вытекает уравнение Рашфорда–Райса [33]:

$$F(V) = \sum_{i=1}^N \frac{z_i(K_i - 1)}{V(K_i - 1) + 1} = 0. \quad (11)$$

Данное уравнение используется при решении задач расчета парожидкостного равновесия многокомпонентных систем и решается методом половинного деления. В частности, в зависимости от значения корня функции $F(V)$ получают следующие критерии фазового состояния смеси состава z_i , соответствующие заданным константам равновесия:

а) $V < 0$ – смесь находится в однофазном ненасыщенном жидком состоянии. $F(0) < 0$ и, соответственно, необходимым критерием данного состояния является выполнение условия:

$$\sum_{i=1}^N z_i K_i < 1; \quad (12)$$

б) $V = 0$ – смесь находится в однофазном насыщенном жидком состоянии (точка кипения). $F(0) = 0$ и, соответственно, необходимым критерием данного состояния является выполнение условия:

$$\sum_{i=1}^N z_i K_i = 1; \quad (13)$$

в) $0 < V < 1$ – смесь находится в двухфазном парожидкостном состоянии. $F(0) > 0$, $F(1) < 0$ и, следовательно, необходимым критерием данного состояния является выполнение условия:

$$\sum_{i=1}^N z_i K_i > 1; \quad \sum_{i=1}^N \frac{z_i}{K_i} > 1; \quad (14)$$

г) $V = 1$ – смесь находится в однофазном насыщенном паровом (газовом) состоянии (точка росы). $F(1) = 0$ и отсюда следует необходимое условие существования данного состояния:

$$\sum_{i=1}^N \frac{z_i}{K_i} = 1; \quad (15)$$

д) $V > 1$ – смесь находится в однофазном ненасыщенном газовом состоянии. $F(1) > 0$ и, соответственно, необходимым критерием данного состояния является выполнение условия:

$$\sum_{i=1}^N \frac{z_i}{K_i} < 1. \quad (16)$$

Следует отметить, что данные критерии идентификации фазового состояния смеси являются необходимыми, но не достаточными. Критерии (13)–(15) являются достаточными только в том случае, если константы равновесия соответствуют

составам равновесных фаз, т. е. тем составам, при которых летучести каждого компонента в паровой и жидкой фазах равны. Неравенства (12) и (16) используются только как вспомогательные критерии в процессе решения задач расчета давления начала кипения и давления начала конденсации многокомпонентной системы методом последовательных приближений. Очевидно, что входящие в неравенства (12) и (16) значения констант равновесия не могут соответствовать равновесным составам фаз, так как эти неравенства являются критериями однофазного ненасыщенного состояния смеси, т. е. того состояния, при котором фазовое равновесие невозможно.

Второе приближение при моделировании фазового равновесия: алгоритм расчета с помощью уравнения состояния Пенга–Робинсона. После расчета начальных приближений K_i по уравнению (5) и формулы Вильсона (6) приступают ко второму приближению – к уточнению констант фазовых равновесий с помощью уравнения состояния. Алгоритм решения с помощью известного уравнения состояния Пенга–Робинсона, рекомендуемого для прогнозирования фазовых процессов в углеводородных средах, следующий:

1) по составам, полученным с помощью уравнения Рашфорда–Райса, жидкой и паровой фаз определяют коэффициенты уравнения состояния:

$$b_V = \sum_{i=1}^N y_i b_i, \quad b_L = \sum_{i=1}^N x_i b_i, \quad (17)$$

$$b_i = b_0 \frac{RT_{ci}}{P_{ci}}, \quad b_0 = 0,077796, \quad (18)$$

$$a_V = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N y_i y_j (a_i a_j)^{1/2} (1 - d_{ij}),$$

$$a_L = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j (a_i a_j)^{1/2} (1 - d_{ij}), \quad (19)$$

$$a_i = a_{ci} \alpha_i, \quad (20)$$

$$a_{ci} = a_0 \frac{(RT_{ci})^2}{P_{ci}}, \quad a_0 = 0,457235, \quad (21)$$

$$\alpha_i = [1 + n_i (1 - \sqrt{T_{ri}})]^2, \quad (22)$$

$$n_i = 0,37646 + 1,54226 \omega_i - 0,26992 \omega_i^2, \quad (23)$$

если $\omega_i > 0,49$, то используется следующее уравнение:

$$n_i = 0,379642 + (1,48503 - (0,164423 - 1,016666 \omega_i) \omega_i) \omega_i, \quad (24)$$

$$A_V = \frac{a_V P}{(RT)^2}, \quad A_L = \frac{a_L P}{(RT)^2}, \quad (25)$$

$$B_V = \frac{b_V P}{RT}, \quad B_L = \frac{b_L P}{RT}, \quad (26)$$

где α_i – температурный коэффициент [в (22)]; $T_r = T/T_{ci}$ – приведенная температура; d_{ij} – коэффициент парного взаимодействия между молекулами компонентов;

- 2) решают полиномиальное уравнение (2), при этом коэффициенту Z_V паровой фазы соответствует наибольший корень из положительных действительных корней, а коэффициенту Z_L жидкой фазы – наименьший;
- 3) рассчитывают летучести для каждого компонента в жидкой и паровой фазе по формулам [1, 26]:

$$\ln(\Phi_{i,V}) = \ln\left(\frac{f_{i,V}}{y_i P}\right) = -\ln(Z_V - B_V) + \frac{b_i}{b_V}(Z_V - 1) - \frac{A_V}{2,8284 B_V} \left(\frac{2 \sum_{j=1}^N y_j (a_i a_j)^{1/2} (1 - d_{ij})}{a_V} - \frac{b_i}{b_V} \right) \times \times \ln\left(\frac{Z_V + 2,4142 B_V}{Z_V - 0,4142 B_V}\right), \quad (27)$$

$$\ln(\Phi_{i,L}) = \ln\left(\frac{f_{i,L}}{x_i P}\right) = -\ln(Z_L - B_L) + \frac{b_i}{b_L}(Z_L - 1) - \frac{A_L}{2,8284 B_L} \left(\frac{2 \sum_{j=1}^N x_j (a_i a_j)^{1/2} (1 - d_{ij})}{a_L} - \frac{b_i}{b_L} \right) \times \times \ln\left(\frac{Z_L + 2,4142 B_L}{Z_L - 0,4142 B_L}\right), \quad (28)$$

где $f_{i,V}$, $f_{i,L}$ – летучести паровой и жидкой фаз соответственно, Па; $\Phi_{i,V}$, $\Phi_{i,L}$ – коэффициенты летучести паровой и жидкой фаз.

Условием того, что полученные компонентные составы жидкой и паровой фаз находятся в равновесии, является система:

$$\begin{cases} f_{i,V} - f_{i,L} = 0; \\ z_i = y_i V + x_i L; \\ \sum_{i=1}^N x_i = 1, \quad \sum_{i=1}^N y_i = 1; \quad \text{при } i = \overline{1, N}. \\ V + L = 1. \end{cases} \quad (29)$$

На первых итерациях в качестве метода решения системы уравнений (29) применяют метод последовательных приближений. В дальнейшем обеспечение сходимости решения достигается с привлечением метода Ньютона [1].

Заметим, что усилия по корректировке алгоритмов, по которым работает HYSYS, в большинстве своем бесперспективны [34]. Более того, существуют данные, что результаты расчета, получен-

ные в программе HYSYS на базе уравнения Пенга–Робинсона, могут не совпадать с результатами, полученными с помощью других коммерческих программ на базе аналогичного уравнения. Это может быть связано с тем, что уравнение состояния Пенга–Робинсона в среде HYSYS содержит модифицированные коэффициенты бинарного взаимодействия [24].

Методики расчета теплофизических свойств многокомпонентных углеводородных газовых систем. В характеристике локальных явлений в смесях важным является представление об изменениях теплофизических свойств. Кинетическая теория газов [35] устанавливает корреляционные соотношения между коэффициентом динамической вязкости и другими теплофизическими свойствами. Поэтому в расчетах акцентируется внимание на методах вычисления вязкости. Некоторые данные о распределениях свойств смеси представлены ниже.

Вязкость. Известно [36], что зависимость вязкости газовой смеси от состава обычно нелинейная и использование правила аддитивности для ее определения может привести к значительным погрешностям. Развитие исследований в области природы и величин взаимодействия молекул дало возможность рассчитывать вязкость газов по методам статистической механики, а также с помощью методов соответственных состояний. Силы взаимодействия неполярных молекул хорошо определяются уравнением Леннарда–Джонса:

$$E_{ij}(r) = 4\varepsilon_{ij} \left[\left(\frac{\sigma_{ij}}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma_{ij}}{r} \right)^6 \right], \quad (30)$$

где $E_{ij}(r)$ – потенциальная энергия, эрг; r – расстояние между двумя молекулами, Å; ε_{ij} – глубина потенциальной ямы (максимум энергии притяжения), эрг; σ_{ij} – диаметр столкновений молекул с малой энергией, Å.

Согласно [35] можно приближенно рассчитать коэффициент динамической вязкости газа с неполярными молекулами, находящегося под умеренным давлением:

$$\mu_i = 266,93 \cdot 10^{-7} \frac{\sqrt{M_i T}}{\sigma_i^2 \Omega_V}, \quad (31)$$

где μ_i – коэффициент динамической вязкости, г/(см·с); M_i – молекулярная масса; Ω_V – интеграл столкновений для переноса импульса (функция характеристической температуры $T_i^* = kT/\varepsilon_i$); k – постоянная Больцмана, эрг/К; ε_i/k – параметр потенциальной функции межмолекулярного взаимодействия, К; σ_i – диаметр столкновений, Å. Табличные значения величин ε_i/k и σ_i для большого числа компонентов приведены в источниках [32, 35]. В случае отсутствия табличных значений можно вычислить их по выражениям Л. Ти, С. Готтоха и В. Стьюарта [37]:

$$\sigma_i = \frac{(2,3551 - 0,0874\omega_i)}{(P_{ci} / T_{ci})^{1/3}}, \quad (32)$$

$$\varepsilon_i / k = T_{ci} (0,7915 + 0,1693\omega_i). \quad (33)$$

Согласно [32], уравнения (32) и (33) позволяют рассчитывать коэффициент динамической вязкости с точностью до 3 %. Важно отметить, что табличные значения для некоторых компонентов по различным источникам заметно отличаются. Поэтому в нашем случае, в силу того что в смеси присутствует гипотетический компонент, значения σ_i и ε_i/k определяются с помощью уравнений (32) и (33) соответственно.

Для вычисления интеграла столкновений для переноса импульса Ω_V в (31) предлагается достаточно большое количество эмпирических уравнений [32]. Д. Райхенберг [38] высказал предположение, что $\lg \Omega_V$ является почти линейной функцией $\lg T_i^*$:

$$\Omega_V = a T_i^{*n}. \quad (34)$$

В качестве коэффициентов a и n многими специалистами предложено множество различных значений при разных диапазонах величины T_i^* . Согласно П. Нойфельду [39] интеграл столкновений можно представить в виде

$$\Omega_V = \frac{1,16145}{T_i^{*0,14874}} + \frac{0,52487}{e^{0,7732 T_i^*}} + \frac{2,16178}{e^{2,43787 T_i^*}}. \quad (35)$$

Не менее распространенным является уравнение, предложенное Н.А. Анфимовым [40]:

$$\Omega_V = 1,157 T_i^{*-0,1472}. \quad (36)$$

Помимо методов, сформулированных на теории Чепмена–Энскога, существуют методы, основанные на принципе соответственных состояний [32]. Одним из таких является метод И.Ф. Голубева [36], основанный на преобразовании формулы М. Траутца:

$$\mu_i = \begin{cases} \mu_{ci} T_{ri}^{0,965} & \text{при } T_{ri} < 1 \\ \mu_{ci} T_{ri}^{0,71+0,29/T_{ri}} & \text{при } T_{ri} > 1 \end{cases}, \quad (37)$$

где $T_{ri} = T/T_{ci}$ – приведенная температура; μ_{ci} – коэффициент динамической вязкости при критической температуре и атмосферном давлении, П. Последнее определяется следующим соотношением:

$$\mu_{ci} = 3,5 \cdot 10^{-6} \frac{M_i^{1/2} P_{ci}^{2/3}}{T_{ci}^{1/6}}. \quad (38)$$

При вычислении вязкости для смеси газов хорошие результаты дает метод С. Вильке [41]:

$$\mu = \sum_{i=1}^N \frac{y_i \mu_i}{\sum_{i=1}^N y_j \Phi_{ij}}, \quad (39)$$

где Φ_{ij} определяется выражением

$$\Phi_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{1/2} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2}{\left[8 \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right) \right]^{1/2}}. \quad (40)$$

Теплопроводность. Значения коэффициента теплопроводности, подобно значениям коэффициента вязкости, можно рассчитать согласно кинетической теории газов. Гиршфельдер, Берд и Кертисс [35] вывели уравнение для многоатомных газов с поправкой Эйкена, в котором бы учитывалась передача энергии между поступательными и внутренними степенями свободы молекул. Уравнение имеет вид:

$$\lambda_i = \frac{15}{4} \frac{R}{M_i} \mu_i \left(\frac{4}{15} \frac{C_{vi}}{R} + \frac{3}{5} \right), \quad (41)$$

где λ_i – теплопроводность, Вт/(м·К); C_{vi} – молярная теплоемкость при постоянном объеме, Дж/(моль·К).

Для определения коэффициента теплопроводности смеси газов можно воспользоваться эмпирическим уравнением, которое было предложено А. Васильевой [42] в 1904 г. и позже, в 1958 г., модифицировано Е. Мэсоном и С. Саксенем [43]. В форме, аналогичной теоретическому соотношению для вязкости, уравнение имеет вид:

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \frac{y_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^N y_j A_{ij}}, \quad (42)$$

где параметр A_{ij} определяется соотношением

$$A_{ij} = m \frac{\left[1 + \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_j} \right)^{1/2} \left(\frac{M_i}{M_j} \right)^{1/4} \right]^2}{\left[8 \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right) \right]^{1/2}}. \quad (43)$$

В качестве коэффициента m в уравнении (43) Мэсон и Саксен [43] сначала предложили $m=1,065$, позднее Тондон и Саксен [44] нашли, что $m=0,85$ [32]. В литературе [32] используется $m=1$.

Значение C_{vi} в (41) определяется из соотношения Р. Майера, которое справедливо для идеальных газов:

$$C_{vi} = C_{pi} - R. \quad (44)$$

Молярную теплоемкость i -го компонента при постоянном давлении C_{pi} вычисляют по выражению

$$C_{pi} = c_{pi} M_i, \quad (45)$$

где c_{pi} – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К). Значения удельных теплоемкостей c_{pi} для компонентов можно определить пу-

тем аппроксимации табличных данных из справочника по теплофизическим свойствам Н.Б. Варгафтика [45]. Для гипотетической компоненты C_{6+} возможно использование табличного значения близкого по молекулярной массе углеводорода н-Ундекана. Удельная теплоемкость смеси c_p вычисляется по выражению

$$c_p = \sum_{i=1}^N c_i c_{pi}, \quad (46)$$

где c_i – массовые доли компонентов.

Коэффициент диффузии. Коэффициент диффузии характеризует скорость переноса вещества из одной области в другую. В фундаментальных исследованиях Гиршфельдера, Кертисса и Берда [35] молекулярной кинетической теории жидкостей и газов изложены выражения для коэффициентов диффузии бинарных смесей, самодиффузии и диффузии многокомпонентных систем. Формула расчета коэффициента диффузии многокомпонентных систем, согласно изложениям данных авторов, сложна и громоздка. Однако его поведение вполне корректно описывает упрощенная формула Вильке, полученная с использованием уравнения Стефана–Максвелла для многокомпонентных систем [46]:

$$D_i = \frac{1 - y_i}{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \frac{y_j}{D_{ij}}}, \quad (47)$$

где D_i – эффективный коэффициент диффузии компонента i в смеси, $\text{см}^2/\text{с}$; D_{ij} – коэффициент бинарной диффузии системы компонентов i – j , $\text{см}^2/\text{с}$; y_i – мольные доли компонентов в смеси. Коэффициент бинарной диффузии согласно кинетической теории газов определяется выражением

$$D_{ij} = 0,002628 \frac{\sqrt{T^3(M_i + M_j) / 2M_i M_j}}{P \sigma_{ij}^2 \Omega_D}, \quad (48)$$

где Ω_D – интеграл столкновений для переноса масс (функция характеристической температуры $T_{ij}^* = kT / \varepsilon_{ij}$); σ_{ij} и ε_{ij} определяются следующими выражениями:

$$\sigma_{ij} = \frac{\sigma_i + \sigma_j}{2}, \quad (49)$$

$$\varepsilon_{ij} = \sqrt{\varepsilon_i \varepsilon_j}. \quad (50)$$

Эффективный коэффициент диффузии компонента в смеси характеризует скорость молекулярного переноса рассматриваемого компонента при конкретных условиях, зависит от коэффициентов бинарной диффузии каждой пары компонентов, а также от состава смеси.

Для вычисления интеграла столкновений Ω_D в (48) можно воспользоваться связями, предложенными в работах П. Нойфельда [39], Н.А. Анфимова [40]. По Н.А. Анфимову для интеграла столкновений при переносе массы вещества имеем:

$$\Omega_D = 1,074 T_{ij}^{*-0,1604}. \quad (51)$$

Уравнение П. Нойфельда:

$$\Omega_D = \frac{1,06036}{T_{ij}^{*0,15610}} + \frac{0,19300}{e^{0,47635 T_{ij}^*}} + \frac{1,03587}{e^{1,52996 T_{ij}^*}} + \frac{1,76474}{e^{3,89411 T_{ij}^*}}. \quad (52)$$

Однако в характеристике локальных явлений в многокомпонентных системах важным является не только представление о взаимодействии отдельных компонентов, но и общая картина поведения системы. Согласно Гиршфельдеру, Кертиссу и Берду [35], динамическая вязкость однокомпонентной системы прямо пропорционально связана с её коэффициентом самодиффузии D_{ii} следующим соотношением:

$$D_{ii} = \frac{\mu_i}{\rho_i} \frac{6 \Omega_V}{5 \Omega_D}. \quad (53)$$

Предположив, что молекулы газа физически идентичны, можно предположить данную формулу для определения коэффициента самодиффузии смеси в целом, где значения параметров потенциальной функции межмолекулярного взаимодействия для смеси σ и ε определяются аналогично (49) и (50), т. е. σ вычисляется путем арифметического усреднения, а ε – геометрического:

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i}{N}, \quad (54)$$

$$\varepsilon = \sqrt[N]{\prod_{i=1}^N \varepsilon_i}. \quad (55)$$

Таким образом, при принятом допущении коэффициент самодиффузии смеси D показал бы среднюю скорость диффузии смеси в целом.

Число Прандтля. Определение числа Прандтля (Pr) имеет большое значение не только для расчетов процессов и аппаратов химической технологии, но также и для оценки величины теплопроводности газов. Оно характеризует соотношение между интенсивностями переноса импульса и переноса тепла теплопроводностью в веществе. Число Прандтля определяется из соотношения

$$\text{Pr} = \frac{\mu c_p}{\lambda}. \quad (56)$$

Здесь коэффициент теплопроводности берется вместе с коэффициентом динамической вязкости, с использованием которого он рассчитывался.

Число Шмидта. В процессах массообмена критерием, характеризующим относительную роль молекулярных процессов переноса количества движения и переноса массы примеси диффузией, является число Шмидта (Sc). Оно равно отношению коэффициента кинематической вязкости к коэффициенту диффузии вещества. В многокомпонентных системах обычно рассчитывают число Шмидта для каждой пары компонентов. Однако мы, используя коэффициент самодиффузии смеси, предлагаем найти и число Шмидта для смеси:

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D} \quad (57)$$

Подставляя уравнение (53) в (57), можно получить выражение для числа Шмидта:

$$Sc = \frac{5 \Omega_D}{6 \Omega_V} \quad (58)$$

Число Льюиса. Соотношение между интенсивностями переноса массы компонента диффузией и переноса теплоты теплопроводностью характеризует число Льюиса (Le). Как и число Шмидта в многокомпонентных системах, число Льюиса обычно рассчитывают для каждой пары компонентов. Для нашего случая оно рассчитывается для смеси в целом из следующего выражения [47]:

$$Le = \frac{\lambda}{\rho D c_p} \quad (59)$$

Из формулы (58) следует:

$$Le = \frac{Sc}{Pr} \quad (60)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Валидация и верификация физико-математической модели для прогнозирования фазовых процессов. Модель первой ступени сепарации была построена на базе данных компонентного состава пластовой нефти Вынгапуровского месторождения, у которой плотность $\rho=817,4$ кг/м³ и молекулярная масса $M=91$ кг/кмоль [6].

При формулировке модели были приняты следующие допущения: режим стационарный; геометрия сепаратора не учитывается; расходы газа и жидкости постоянны; давление и температура в сепараторе постоянны ($T=0-70$ °С, $P=50-700$ кПа); система находится в термодинамическом равновесии; не учитываются тепловые потери через стенку сепаратора за счет температуры окружающей среды; гидравлическое сопротивление емкости и штуцеров сепаратора пренебрежимо малы; при анализе компонентного состава допускается диффузионное разделение смеси при замороженных химических реакциях между компонентами смеси.

В работе [6] представлена методика обоснования рационального режима сепарации скважинной продукции на примере месторождений ОАО «Газпромнефть-Ноябрьскнефтегаз» и расчетные результаты оптимизации этого процесса с помощью программного продукта «Газ-сепаратор». Однако отсутствует информация об экспериментальных данных промышленного сепаратора. Тем не менее были сравнены результаты нашего моделирования процесса сепарации с результатами [6] при одинаковых термобарических условиях: $P=0,6$ МПа и $T=15$ °С (табл. 1). В качестве термодинамического пакета, помимо уравнения состояния Пенга-Робинсона (PR), с целью сравнительного анализа, были использованы различные модели: уравнение

состояния Ли-Кеслера-Плокера (LKP), полуэмпирическая модель Грейсона-Стрида (GS), уравнение Ренона-Праусница (NRTL). Алгоритмы решения данных моделей достаточно громоздки, и из-за недостатком места мы их не приводим. Некоторые детали алгоритмов могут быть найдены в [24].

Таблица 1. Проверка на адекватность построенной модели сепаратора

Table 1. Validation and verification of mathematical model

Компонент Component	Компонентный состав выходящего потока газа в программе HYSYS Off-gas component composition in the program HYSYS				Компонентный состав выходящего потока газа в программе «Газ-сепаратор» [6] Off-gas component composition in the program «Gaz – separator» [6]
	PR	LKP	NRTL	GS	
Двуокись углерода Carbon dioxide	0,09	0,08	0,09	0,08	0,09
Азот Nitrogen	0,83	0,76	0,85	0,81	0,82
Метан Methane	65,48	61,75	66,58	63,83	65,19
Этан Ethane	13,00	13,88	13,27	13,11	13,26
Пропан Propane	13,67	16,16	13,28	14,48	13,23
Изобутан i-Butane	1,98	2,20	1,74	2,07	2,15
н-Бутан n-Butane	2,63	2,88	2,34	2,89	3,08
Изонпентан i-Pentane	0,47	0,47	0,37	0,50	0,39
н-Пентан n-Pentane	0,39	0,38	0,31	0,43	0,33
C ₆₊ высшие C ₆₊ higher	1,46	1,43	1,17	1,79	1,46
Среднее расхождение, % Average divergence, %	6,82	9,57	8,38	11,43	–

Из табл. 1 видно, что наилучшую корреляцию с результатами работы [6] дало уравнение состояния Пенга-Робинсона, тем самым подтвердив свое превосходство над другими уравнениями. При этом стоит отметить, что концентрации легких углеводородов (метан, этан, пропан), углеводородов C₆₊высшие и неуглеводородных компонентов в выходящем потоке газа хорошо коррелируют с данными работы [6], а концентрации бутанов и пентанов имеют относительно высокое расхождение. Это объясняется отсутствием недостаточной полной информации входных данных промышленного сепаратора и различием методов расчета. Тем не менее среднее расхождение с использованием уравнения состояния Пенга-Робинсона составляет 6,82 %.

Для проверки адекватности вышеперечисленных методов по определению вязкости сравнили по-

лученные результаты для чистых веществ с экспериментальными данными из [45]. Вычисления коэффициентов динамической вязкости азота, этана, пропана, бутанов и пентанов проводились для $T=25$ °С, метана – для $T=27$ °С, двуокиси углерода – для $T=20$ °С, а также для атмосферного давления. Сравнительный анализ показал, что наилучшую корреляцию при расчете вязкости чистых веществ с экспериментальными данными дает метод Чепмена–Энскога с применением уравнения Нойфельда при вычислении Ω_v (относительная погрешность 2,63 %). Чуть большее расхождение наблюдается у метода Голубева (соответствующая погрешность 4,95 %), а у метода Чепмена–Энскога с применением уравнения Анфимова при вычислении Ω_v наблюдается достаточно высокое расхождение (погрешность 33,67 %). Средняя погрешность значений, полученных с помощью HYSYS, относительно экспериментальных данных составила всего 2,26 %, что подтверждает достоверность результатов, полученных с помощью данного программного продукта.

С целью валидации и верификации получаемых результатов расчета теплопроводности по корреляции (41) сравнили результаты вычислений для чистых веществ с экспериментальными данными из [46]. Расчеты коэффициентов теплопроводности проводились для $T=0$ °С и атмосферного давления. В качестве коэффициента динамической вязкости в (41) были использованы три варианта: по методу Голубева, по методу Чепмена–Энскога с применением уравнений Нойфельда и Анфимова при решении Ω_v . Таким образом, сравнительный анализ показал, что наилучшую корреляцию при расчете теплопроводности чистых веществ с экспериментальными данными дает использование вязкости, полученной с помощью метода Голубева. Чуть большее расхождение наблюдается у вязкости Чепмена–Энскога с применением уравнения Нойфельда при вычислении Ω_v , а у вязкости Чепмена–Энскога с применением уравнения Анфимова при вычислении Ω_v наблюдается достаточно высокое расхождение. Расхождение значений HYSYS с экспериментальными данными, в отличие от случая с вязкостью, относительно высокое. Экспериментальный материал, относящийся к теплопроводности газов, невелик и в большинстве случаев недостаточно точен [46]. Поэтому имеет смысл доверять результатам расчетов HYSYS, в силу того что расчет теплопроводности в нём проводится на базе табличных параметров (ацентрический фактор, молекулярный вес и идеальная теплоемкость) всех имеющихся библиотечных компонентов [24].

Для оценки достоверности вычислений теплоемкостей сравнили свои результаты с данными из HYSYS. Сравнение показало, что полученные расчетные значения C_p на базе табличных значений [45] хорошо коррелируют с результатами, полученными в среде HYSYS. Среднее расхождение составляет 8,44 %.

Для оценки достоверности результатов применения уравнений Анфимова и Нойфельда при вычислении Ω_v и Ω_D в (53) вычислили коэффициенты самодиффузии некоторых отдельных компонентов и сравнили с экспериментальными данными. Согласно оценкам более достоверные результаты при расчете самодиффузии чистых веществ дает использование уравнения Нойфельда при решении Ω_v и Ω_D (средняя погрешность 9,05 %).

Результаты расчета фазового равновесия. В рамках определенных термобарических условий, согласно цели исследования, построены поверхности, описывающие эволюцию концентраций компонентов выходящего потока газа в зависимости от изменений полей температур и давлений. Некоторые из этих данных представлены на рис. 1.

Следует отметить, что существуют условия, при которых значения концентрации каждого компонента в HYSYS остаются неизменными. Эти условия имеют место в плоскости изобары $P=50$ кПа при температурах $T\approx 30-70$ °С, в плоскости изобары $P=100$ кПа при температурах $T\approx 50-70$ °С и в плоскости изотермы $T=70$ °С при давлениях $P\approx 50-200$ кПа. Данные условия находятся за пределами двухфазной области – в области однофазного ненасыщенного газового состояния, т. е. в той области, где фазовое равновесие невозможно. Поэтому HYSYS показывает одинаковые компонентные составы в выходящих из сепаратора паровом и жидком потоках, т. е. константа фазового равновесия $K_i=1$ для всех компонентов. Детали поведений концентраций данных компонент представлены в табл. 2.

Настоящее исследование показывает существенную роль в процессах сепарации механизмов диффузии, обусловленных как прямыми (концентрационная и тепловая диффузия), так и скрещивающимися (термодиффузия, диффузионная теплопроводность и динодиффузия) эффектами [48]. Они неразрывно существуют в многокомпонентных неизоэнтальпических системах. Поэтому в прикладных расчетах компонентного состава в указанном диапазоне изменений термобарических условий рекомендуется учитывать весь спектр мелкомасштабных взаимодействий между компонентами смеси.

Для верификации модели в данной работе выполнено сравнение компонентного состава газа при условиях, аналогичных данным из [6] ($P=0,6$ МПа, $T=15$ °С), с компонентным составом газа при предлагаемых условиях ($P=0,7$ МПа, $T=0$ °С). Таким образом, установлено, что применив данные условия к существующему сепаратору, удастся снизить концентрации тяжелых углеводородов (C_{4+} высшие) в выходящем потоке газа до 48,41 %.

Результаты расчета теплофизических свойств. Ниже приведены результаты расчетов теплофизических свойств газовой смеси по представленным выше методикам (рис. 2–8). В силу отсутствия от-

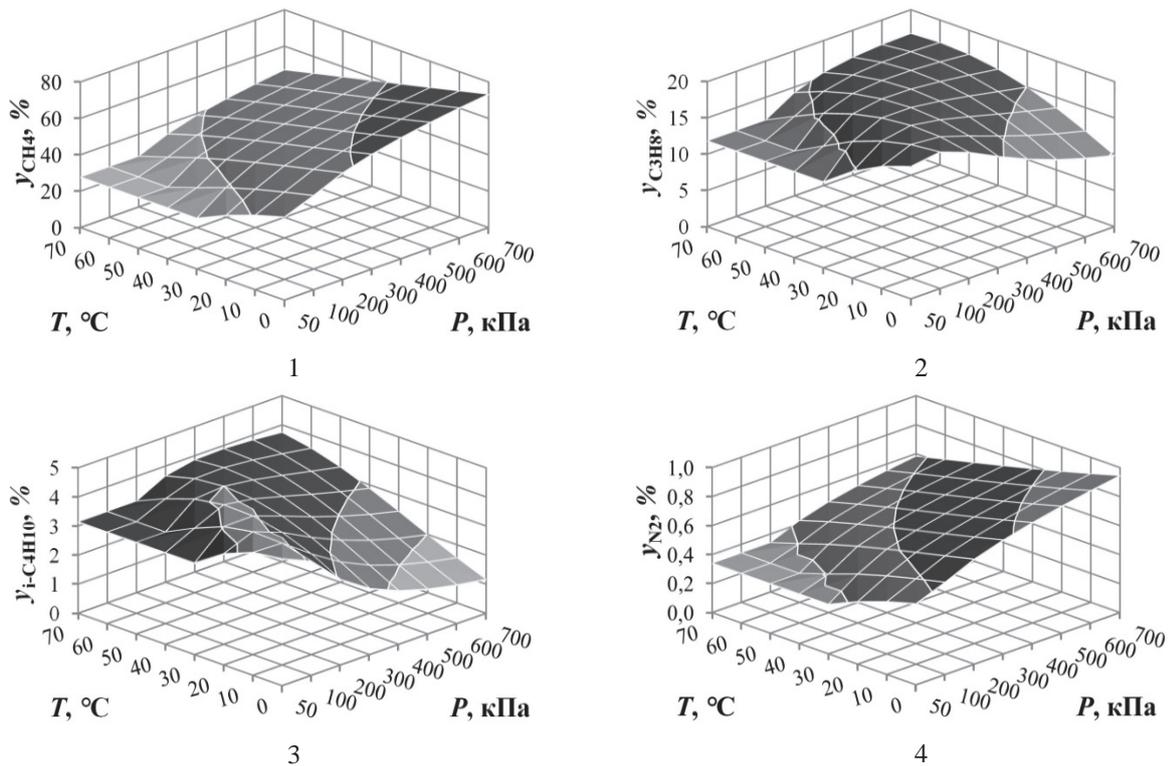


Рис. 1. Эволюции концентраций компонентов газовой смеси в зависимости от изменения температуры и давления: 1) метана; 2) пропана; 3) изобутана; 4) азота

Fig. 1. Evolutions of gas mixture component concentrations depending on change of temperature and pressure of: 1) methane; 2) propane; 3) i-butane; 4) nitrogen

Таблица 2. Описание эволюции концентраций компонент в выходящем потоке газа в зависимости от изменений температуры и давления

Table 2. Description of evolution of component concentration in gas mixture depending on temperature and pressure change

Компонент Component	Плоскости изотерм Isothermal planes	Плоскости изобар Isobaric planes
Метан Methane	Во всех изотермах с увеличением давления концентрация возрастает Concentration is rising at pressure increase in all isotherms	Во всех изобарах с увеличением температуры концентрация убывает Concentration is declining at temperature increase in all isobars
Пропан Propane	В изотермах $T = \{0, 10, 20, 30, 40, 50, 60\}$ °C имеются экстремумы при $P = \{100, 100, 200, 300, 300, 400, 600\}$ кПа соответственно. В изотерме $T = 70$ °C концентрация с увеличением давления возрастает In isotherms $T = \{0, 10, 20, 30, 40, 50, 60\}$ °C there are extremums at $P = \{100, 100, 200, 300, 300, 400, 600\}$ kPa, respectively. In isotherm $T = 70$ °C the concentration is rising at pressure increase	В изобаре $P = \{50, 100\}$ кПа концентрация с увеличением температуры убывает, а в изобарах $P = \{200, 300, 400, 500, 600, 700\}$ кПа имеются экстремумы при $T = \{10, 20, 30, 40, 50, 50, 60\}$ °C соответственно In isobars $P = \{50, 100\}$ kPa the concentration is declining at temperature increase, and in isobars $P = \{200, 300, 400, 500, 600, 700\}$ kPa there are extremums at $T = \{10, 20, 30, 40, 50, 50, 60\}$ °C, respectively
Изобутан i-Butane	В изотермах $T = \{20, 30, 40, 50, 60, 70\}$ °C имеются экстремумы при $P = \{100, 200, 200, 300, 400, 500\}$ кПа соответственно. В остальных изотермах концентрация с увеличением давления убывает In isotherms $T = \{20, 30, 40, 50, 60, 70\}$ °C there are extremums at $P = \{100, 200, 200, 300, 400, 500\}$ kPa, respectively. In other isotherms the concentration is declining at pressure increase	В изобарах $P = \{100, 200, 300, 400\}$ кПа имеются экстремумы при $T = \{20, 40, 50, 60\}$ °C соответственно. В изобаре $P = 50$ кПа с увеличением температуры концентрация убывает, а в изобарах $P = \{500, 600, 700\}$ кПа – возрастает In isobars $P = \{100, 200, 300, 400\}$ kPa there are extremums at $T = \{20, 40, 50, 60\}$ °C, relatively. In isobar $P = 50$ kPa the concentration is declining at temperature increase, and in isobars $P = \{500, 600, 700\}$ kPa it is rising
Азот Nitrogen	Поведение аналогично метану Behavior is similar to methane	

дельной экспериментальной информации, необходимой для замыкания соотношений к расчету теплофизических свойств, в качестве эталонных данных принимались результаты вычислений в программе HYSYS, так как результаты, полученные в данной программе, показывают очень точное согласие с экспериментальными данными. Средние расхождения результатов расчета вязкости методом Голубева и методом Чепмена–Энскога с результатами HYSYS составили 13,82 % и 18,72 % соответственно (рис. 2).

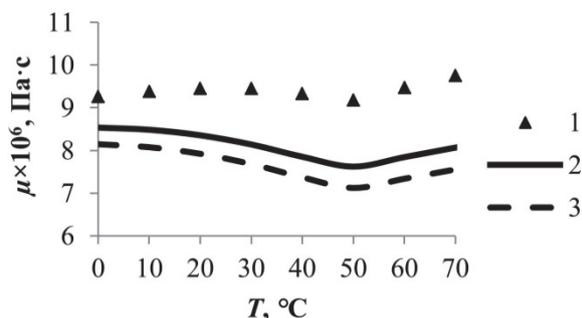


Рис. 2. Зависимость коэффициента динамической вязкости газовой смеси от температуры при атмосферном давлении: 1 – в HYSYS; 2 – μ , по методу Голубева; 3 – μ , по методу Чепмена–Энскога

Fig. 2. Dependence of dynamic viscosity of gas mixture on temperature at the atmospheric pressure: 1 – in the program HYSYS; 2 – μ , by the Golubev's method; 3 – μ , by the Chapman–Enskog method

Важно отметить, что тенденции изменений вычисленных значений коэффициентов динамической вязкости различными методами повторяют тенденцию изменения значений, полученных с помощью программного продукта HYSYS, в зависимости от изменения температуры. На рис. 2 можно увидеть, что в пределах $T \approx 0–50$ °C существует нелинейная зависимость, а при $T \approx 50–70$ °C имеем практически линейную зависимость. Это объясняется переходом системы в сепараторе в однофазное ненасыщенное газовое состояние и, соответственно, постоянством компонентного состава в указанной области температур.

Результаты расчетов коэффициента теплопроводности смеси показали очень близкие значения с результатами HYSYS при $m=1$ в уравнении (43). Здесь погрешность в его расчетах, при использовании методов соответствующих состояний и статистической механики, составила, соответственно, 1,14 % и 3,33 % (рис. 3).

Для отдельных компонентов вычислили эффективные коэффициенты диффузии по формуле Вильке (47), результаты которых приведены на рис. 4.

Как видно на рис. 4, распределения эффективных коэффициентов диффузии всех компонентов с изменением температуры ведут себя аналогичным образом: при $T \approx 0–50$ °C убывают, а при $T \approx 50–70$ °C наблюдается относительное постоян-

ство значений. У подобных по структуре углеводородов распределения почти совпадают, поэтому некоторые из них не были включены в график. Линия эффективного коэффициента диффузии азота лежит очень близко к кривой этана, поэтому она не была включена в графики тоже. Наибольшие значения среди всех компонентов наблюдаются у двуокиси углерода, а наименьшие – у метана.

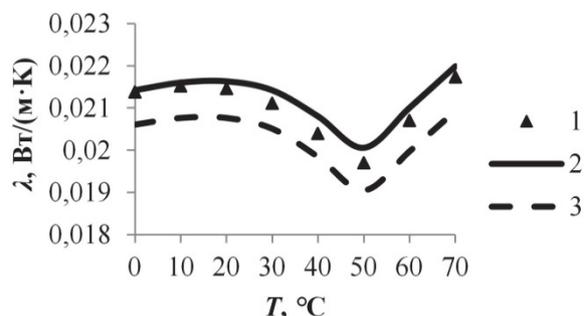


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности газовой смеси от температуры при атмосферном давлении: 1 – в HYSYS; 2 – μ , по методу Голубева; 3 – μ , по методу Чепмена–Энскога

Fig. 3. Dependence of thermal conductivity coefficient of gas mixture on temperature at the atmospheric pressure: 1 – in the program HYSYS; 2 – μ , by the Golubev's method; 3 – μ , by the Chapman–Enskog method

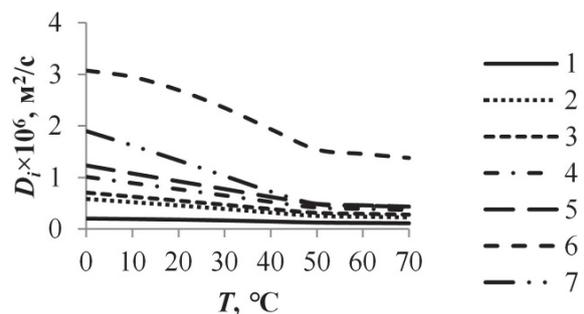


Рис. 4. Эффективные коэффициенты диффузии компонентов газовой смеси в зависимости от температуры при атмосферном давлении: 1 – метан; 2 – этан; 3 – пропан; 4 – изобутан; 5 – изопентан; 6 – двуокись углерода; 7 – C_{6+} высшие

Fig. 4. Effective diffusion coefficients of gas mixture components in dependence to the temperature at the atmospheric pressure: 1 – methane; 2 – ethane; 3 – propane; 4 – i-butane; 5 – i-pentane; 6 – carbon dioxide; 7 – C_{6+} higher

По вычисленным различными методами коэффициентам динамической вязкости газовой смеси были рассчитаны коэффициенты самодиффузии смеси (рис. 5).

Интегралы столкновений в данном случае для смеси определялись по усредненным значениям параметров потенциальной функции межмолекулярного взаимодействия (54) и (55). В случае использования коэффициентов динамических вязкостей, полученных методом Голубева и с помощью HYSYS, соотношения интегралов столкновений

Ω_V/Ω_D в уравнении (53) принимались равными 1,1, так как они практически не зависят от температуры. Используя данные коэффициенты самодиффузии, вычислили критерии подобия для многокомпонентной системы (рис. 6–8).

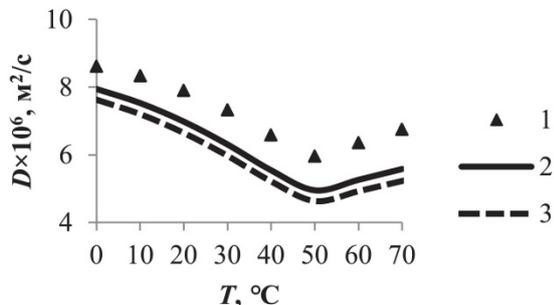


Рис. 5. Коэффициент самодиффузии газовой смеси в зависимости от температуры при атмосферном давлении: 1 – μ , по HYSYS; 2 – μ , по методу Голубева; 3 – μ , по методу Чепмена–Энскога

Fig. 5. Self-diffusion coefficients of gas mixture in dependence to the temperature at the atmospheric pressure: 1 – μ , by the program HYSYS; 2 – μ , by the Golubev's method; 3 – μ , by the Chapman–Enskog method

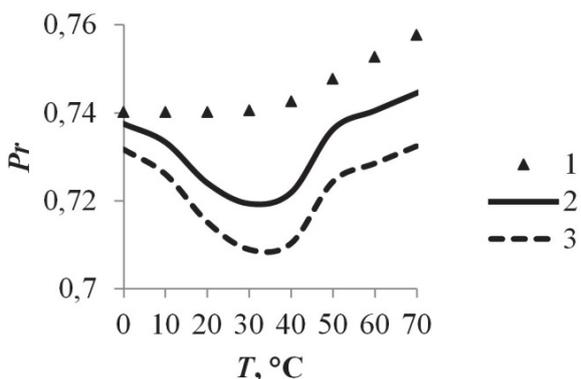


Рис. 6. Зависимость числа Прандтля от температуры при атмосферном давлении: 1 – μ , по HYSYS; 2 – μ , по методу Голубева; 3 – μ , по методу Чепмена–Энскога

Fig. 6. Prandtl number for gas mixture in dependence to the temperature at the atmospheric pressure: 1 – μ , by the program HYSYS; 2 – μ , by the Golubev's method; 3 – μ , by the Chapman–Enskog method

Из рис. 6–8 видно, что все три критерия слабо зависят от

температуры. Важно отметить, что результаты их расчетов ограничены диапазоном соответствующих значений для реальных газов [47, 49, 50]. В случае вычисления числа Прандтля поправочный коэффициент m при определении коэффициента теплопроводности газовой смеси подбирался таким образом, чтобы получить близкие значения с HYSYS. Установлена идентичность распределений чисел Шмидта для вязкостей, полученных с помощью подхода Голубева и методик HYSYS. Число Льюиса для всех комплексов определений коэффициентов вязкости и диффузии ограничено ди-

апазоном порядка единицы, что характерно для многих горючих газов. Это косвенно подтверждает идентичность распределений профилей температуры и компонентного состава в аналогичных условиях процесса сепарации.

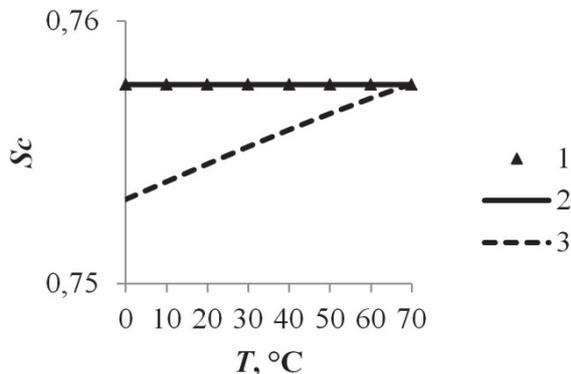


Рис. 7. Зависимость числа Шмидта от температуры при атмосферном давлении: 1 – μ , по HYSYS; 2 – μ , по методу Голубева; 3 – μ , по методу Чепмена–Энскога

Fig. 7. The Schmidt number for gas mixture in dependence to the temperature at the atmospheric pressure: 1 – μ , by the program HYSYS; 2 – μ , by the Golubev's method; 3 – μ , by the Chapman–Enskog method

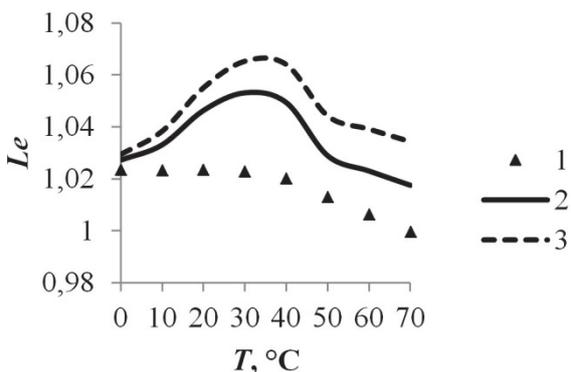


Рис. 8. Зависимость числа Льюиса от температуры при атмосферном давлении: 1 – μ , по HYSYS; 2 – μ , по методу Голубева; 3 – μ , по методу Чепмена–Энскога

Fig. 8. The Lewis number for gas mixture in dependence to the temperature at the atmospheric pressure: 1 – μ , by the program HYSYS; 2 – μ , by the Golubev's method; 3 – μ , by the Chapman–Enskog method

Заключение

Представленные результаты исследования и их детальный анализ позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Показано, что эволюция процессов, определяющих изменения концентраций метана, углеводородов C_{6+} выше, азота и двуокиси углерода в выходящем потоке газа в зависимости от изменения температуры и давления происходят монотонно, а концентрации этана, пропана, бутанов и пентанов, как в плоскостях изобар, так и в плоскостях изотерм, имеют экстремальные области максимальных значений.

2. Выявлено, что при условиях $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P=700\text{ кПа}$ сепарационного процесса удаётся снизить концентрации тяжелых углеводородов ($C_{4+\text{высшие}}$) в выходящем потоке газа до 48,41 %.
3. Результаты прогноза теплофизических свойств, полученных с помощью метода статистической механики и метода соответственных состояний, успешно коррелируют с данными результатов расчетов по HYSYS.
4. Расчеты критериев подобия (чисел Прандтля, Шмидта и Льюиса) определяются диапазонами

соответствующих значений для реальных газов.

Стоит отметить, что в многокомпонентных системах фазовые процессы вполне успешно предсказываются используемой математической моделью. В подобных смесях интенсифицируются механизмы переноса тепла и массы, как за счет прямых, так и скреживающихся эффектов [48]. Однако пренебрежение последними способно заметно исказить картину сепарации в смесях с переменными термобарическими условиями и фазовыми эффектами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брусиловский А.И. Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа. – М.: Грааль, 2002. – 572 с.
2. Khamukhin A.A., Nikolayev E.V. Modeling of Gas Multistage Separation to Increase Stock Tank Oil // *Advanced Materials Research*. – 2014. – V. 1040. – P. 508–512.
3. Khamukhin A.A., Nikolayev E.V. Numerical Simulation of Gas Evolution from Oil-in-Water Flow for Multistage Separation // *Key Engineering Materials*. – 2016. – V. 685. – P. 257–261.
4. Nikolayev E.V., Kharlamov S.N. Detailed Modelling of Hydrocarbonaceous Media Separation Process // *Applied Mechanics and Materials*. – 2016. – V. 835. – P. 315–320.
5. Kylling O.W. Optimizing separator pressure in a multistage crude oil production plan. Dis. Master of Science in Eng. Cybernetic. Norw. Univ. of Science and Technol., 2009. 76 p.
6. Леонтьев С.А., Марченко А.Н., Фоминых О.В. Обоснование рациональных технологических параметров подготовки скважинной продукции Вынгапуровского месторождения // *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»*. – 2012. – № 3. – С. 211–221. URL: http://ogbus.ru/authors/LeontievSA/LeontievSA_1.pdf (дата обращения: 15.04.2014).
7. Mahsakazemi. Optimization of Oil and Gas Multi Stage Separators Pressure to Increase Stock Tank Oil // *Oriental J. of Chemistry*. – 2011. – V. 27. – № 4. – P. 1503–1508. URL: <http://orientjchem.org/download/mahsakazemi/OJCV027I04P1503-1508.pdf> (дата обращения: 13.03.2013).
8. Ahmed W.H., Badr H.M., Al-Sarkhi A. Experimental investigation of oil-water partial separation using a controlled tee junction // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2016. – V. 143. – P. 187–198.
9. Viscosities, thermal conductivities and diffusion coefficients of CO_2 mixtures: Review of experimental data and theoretical models / H. Li, O. Wilhelmsen, Y. Lv, W. Wang, J. Yan // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. – 2011. – V. 5. – P. 1119–1139.
10. Mohammad-Aghaie D., Papari M.M., Ebrahimi A.R. Determination of Transport Properties of Dilute Binary Mixtures Containing Carbon Dioxide through Isotropic Pair Potential Energies // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. – 2014. – V. 3. – P. 274–286.
11. Brown N.J., Bastien L.A.J., Price P.N. Transport properties for combustion modeling // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2011. – V. 37. – P. 565–582.
12. Глумов Д.Н., Стрекалов А.В. Способ расчета динамической вязкости газов в широком диапазоне давлений // *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»*. – 2011. – № 1. – С. 194–210. URL: http://ogbus.ru/authors/Glumov/Dglumov_1.pdf (дата обращения: 23.10.2015).
13. Taghizadeh M., Eftekhari M. Improved Correlations for Prediction of Viscosity of Iranian Crude Oils // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. – 2014. – V. 22. – № 3. – P. 346–354.
14. Comparison of correlations based on API gravity for predicting viscosity of crude oils / F. Sanchez-Minero, G. Sanchez-Reyna, J. Ancheyta, G. Marroquin // *Fuel*. – 2014. – V. 138. – P. 193–199.
15. A FORTRAN computer code package for the evaluation of gas-phase multicomponent transport properties / R.J. Kee, G. Dixon-Lewis, J. Warnatz, M.E. Coltrin, J.A. Miller. – SANDIA, 1986. – 39 p.
16. Experimental measurement of the effective diffusion and thermodynamic coefficients for binary gas mixture in porous media / H. Davarzani, M. Marcoux, P. Costeseque, M. Quintard // *Chemical Engineering Science*. – 2010. – V. 65. – P. 5092–5104.
17. Davarzani H., Marcoux M., Quintard M. Theoretical predictions of the effective thermodynamic coefficients in porous media // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2010. – V. 53. – P. 1514–1528.
18. Abbasi A., Saghir M.Z., Kawaji M. Study of thermodynamic diffusion of carbon dioxide in binary mixtures of n-butane & carbon dioxide and n-dodecane & carbon dioxide in porous media // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2011. – V. 50. – P. 124–132.
19. Bringuier E. Simple ideas about thermodynamic diffusion in binary liquid mixture // *Comptes Rendus Mecanique*. – 2013. – V. 341. – P. 365–371.
20. Srinivasan S., Saghir M.Z. Experimental approaches to study thermodynamic diffusion – a review // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2011. – V. 50. – P. 1125–1137.
21. Rahman M.A., Saghir M.Z. Ground based measurement and theoretical calculation of Soret coefficient of binary hydrocarbon mixtures // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2013. – V. 49. – P. 31–39.
22. Rahman M.A., Saghir M.Z. Thermodynamic diffusion or Soret effect: Historical review // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – V. 73. – P. 693–705.
23. Eslamian M., Saghir M.Z., Bou-Ali M.M. Investigation of the Soret effect in binary, ternary and quaternary hydrocarbon mixtures: New expressions for thermodynamic diffusion factors in quaternary mixtures // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2010. – V. 49. – P. 2128–2137.
24. HYSYS Simulation Basis // Aspen Technology, Inc., 2005. – 527 p.
25. HYSYS User Guide // Aspen Technology, Inc., 2005. – 533 p.
26. Peng D.Y., Robinson D.B. A new two-constant equation of state // *Ind. Eng. Chem. Fundam.* – 1976. – V. 15. – P. 59–64.
27. Фаловский В.И., Хорошев А.С., Шахов В.Г. Современный подход к моделированию фазовых превращений углеводородных систем с помощью уравнения состояния Пенга–Робинсона // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2011. – Т. 13. – № 3. – С. 120–125.
28. Kou J., Sun S. Unconditionally stable methods for simulating multi-component two-phase interface models with Peng–Robinson equation of state and various boundary conditions // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. – 2016. – V. 291. – P. 158–182.

29. Использование различных уравнений состояния для расчета равновесия в системах «пар–жидкость» под высоким давлением / В.С. Кулик, А.М. Чионов, С.А. Коршунов, К.А. Казак, А.С. Казак // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2013. – № 3. – С. 8–12.
30. Wilson G.M. A Modified Redlich-Kwong Equation of State, Application to General Physical Data Calculation // AIChE Natl. Meeting. – Cleveland, Ohio, 1969.
31. Фоминых О.В. Исследование фазовых равновесий углеводородов и обоснование метода их расчета для снижения потерь нефти при разработке месторождений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 2001. – 23 с.
32. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: справочное пособие. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.
33. Rachford N.H., Rice J.D. Procedure for Use of Electrical Digital Computers in Calculating Flash Vaporization Hydrocarbon Equilibrium // Journal of Petroleum Technology. – 1952. – V. 4. – P. 19–20.
34. Акберов Р.Р. Особенности расчета фазового равновесия пар–жидкость многокомпонентных систем при использовании уравнения Соава–Редлиха–Квонга // Теоретические основы химической технологии. – 2011. – Т. 45. – № 3. – С. 329–335.
35. Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. – 933 с.
36. Голубев И.Ф. Вязкость газов и газовых смесей. – М.: Физматгиз, 1959. – 377 с.
37. Tee L.S., Gotoh S., Stewart W.E. Molecular parameters for normal fluids. Lennard–Jones 12–6 potential // Ind. Eng. Chem. Fundamen. – 1966. – V. 5. – № 3. – P. 356–363.
38. Reichenberg D. New methods for the estimation of the viscosity coefficients of pure gases at moderate pressures (with particular reference to organic vapors) // AIChE J. – 1975. – V. 21. – P. 181–183.
39. Neufeld P.D., Janzen A.R., Aziz R.A. Empirical equations to calculate 16 of the transport collision integrals for the Lennard–Jones (12–6) potential // J. Chem. Phys. – 1972. – V. 57. – P. 1100–1102.
40. Анфимов Н.А. Ламинарный пограничный слой в многокомпонентной смеси газов // Известия академии наук СССР. Механика и машиностроение. – 1962. – № 1. – С. 25–31.
41. Wilke C.R. A Viscosity Equation for Gas Mixtures // The Journal of Chemical Physics. – 1950. – V. 18. – P. 517–519.
42. Wassiljewa A. Wärmeleitung in Gasgemischen // Physikalische Zeitschrift. – 1904. – V. 5. – P. 737–742.
43. Mason E.A., Saxena S.C. Approximate Formula for the Thermal Conductivity of Gas Mixtures // Phys. Fluids. – 1958. – V. 1. – P. 361–369.
44. Tondon P.K., Saxena S.C. Thermal conductivity of ternary gas mixtures // Chemical Physics Letters. – 1970. – V. 7. – P. 621–623.
45. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
46. Бретшнайдер С. Свойства газов и жидкостей. – М.; Л.: Химия, 1966. – 536 с.
47. Вильямс Ф.А. Теория горения. – М.: Наука, 1971. – 616 с.
48. Де Гроот С., Мазур П. Неравновесная термодинамика. – М.: Мир, 1964. – 429 с.
49. Коган В.Б. Теоретические основы типовых процессов химической технологии. – Л.: Химия, 1977. – 592 с.
50. Потехин В.М., Потехин В.В. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки. – СПб.: Химиздат, 2007. – 944 с.

Поступила 12.07.2016 г.

Информация об авторах

Николаев Е.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, профессор кафедры транспорта и хранения нефти и газа Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 532:536

RESEARCH OF MULTICOMPONENT HYDROCARBON SYSTEMS SEPARATION IN MODES OF FUNCTIONING OF OIL PRELIMINARY PREPARATION EQUIPMENT

Eugenii V. Nikolayev¹,
nickolaev_evgeny@mail.ru

Sergey N. Kharlamov¹,
kharsn@mail.ru

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

The techniques of separation driving in rheologically complex hydrocarbon media, which are based on modern multiparametric models, are topical and form a basis for obtaining valuable empirical information on multicomponent viscous media flow. Therefore, the research field, related to prediction of phenomena and regularities of separation, is relevant and practically significant for design and operation of equipment for oil and gas preliminary preparation.

The main aim of the study is to determine the regularities of separation in hydrocarbon media within the framework of equilibrium thermodynamics; to give recommendations for practice of applied calculations of component composition under separation of multicomponent mixture at following thermobaric conditions: the temperature is $T \approx 0-70$ °C and pressure is $P \approx 50-700$ kPa.

The methods used in the study: thermodynamic models in HYSYS software such as Peng–Robinson equation of state, Lee–Kesler–Plocker equation of state, NRTL equation, Grayson–Streed semi-empirical model; method of statistical mechanics (Chapman–Enskog method); method of corresponding state (Golubev's method); similarity theory.

The results. The authors have studied the features of separation modeling in hydrocarbon media within the thermodynamic equilibrium and discussed the approaches to calculation of phase equilibrium in multicomponent systems. Regularities and peculiarities of changes in structure of gas mixture depending on temperature and pressure were studied. It was shown that for some separation modes there are conditions of non-monotonic change of structure with extremums that influence significantly the physical properties and intensity of exchange processes of heat and mass transfer in multicomponent hydrocarbon media. The authors calculated thermal and physical properties of gas mixture by different methods. The results were compared with the data obtained by the program Aspen HYSYS and with the experimental data.

Key words:

Multicomponent system, hydrocarbon media, separation, modeling, thermodynamics, thermal and physical properties.

REFERENCES

1. Brusilovsky A.I. *Fazovyie prevrashcheniia pri razrabotke mestorozhdenii nefti i gaza* [Phase transitions when developing oil and gas fields]. Moscow, Graal Publ., 2002. 572 p.
2. Khamukhin A.A., Nikolayev E.V. Modeling of Gas Multistage Separation to Increase Stock Tank Oil. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1040, pp. 508–512.
3. Khamukhin A.A., Nikolayev E.V. Numerical Simulation of Gas Evolution from Oil-in-Water Flow for Multistage Separation. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 685, pp. 257–261.
4. Nikolayev E.V., Kharlamov S.N. Detailed Modelling of Hydrocarbonaceous Media Separation Process. *Applied Mechanics and Materials*, 2016, vol. 835, pp. 315–320.
5. Kylling O.W. *Optimizing separator pressure in a multistage crude oil production plan*. Dis. Master of Science in Eng. Cybernetic, Norw. Univ. of Science and Technol., 2009. 76 p.
6. Leontiev S.A., Marchenko A.N., Fominykh O.V. Basis of preparation of technological parameters of rational production borehole field Vyngapurovskoe. *Oil and Gas Business*, 2012, no. 3, pp. 211–221. Available at: http://ogbus.ru/authors/LeontievSA/LeontievSA_1.pdf/ (accessed 15 April 2014). In Rus.
7. Mahsakazemi. Optimization of Oil and Gas Multi Stage Separators Pressure to Increase Stock Tank Oil. *Oriental J. of Chemistry*, 2011, vol. 27, no. 4, pp. 1503–1508. Available at: <http://orientjchem.org/download/Mahsakazemi/OJCV027I04P1503-1508.pdf/> (accessed 13 March 2013).
8. Ahmed W.H., Badr H.M., Al-Sarkhi A. Experimental investigation of oil-water partial separation using a controlled tee junction. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, vol. 143, pp. 187–198.
9. Li H., Wilhelmssen O., Lv Y., Wang W., Yan J. Viscosities, thermal conductivities and diffusion coefficients of CO₂ mixtures: review of experimental data and theoretical models. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, vol. 5, pp. 1119–1139.
10. Mohammad-Aghaie D., Papari M.M., Ebrahimi A.R. Determination of Transport Properties of Dilute Binary Mixtures Containing Carbon Dioxide through Isotropic Pair Potential Energies. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2014, vol. 3, pp. 274–286.
11. Brown N.J., Bastien L.A.J., Price P.N. Transport properties for combustion modeling. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2011, vol. 37, pp. 565–582.
12. Glumov D.N., Strekalov A.V. Methods of calculating the dynamic viscosity of gases in a wide range of pressures. *Oil and Gas Business*, 2011, no 1, pp. 194–210. Available at: http://ogbus.ru/authors/Glumov/Glumov_1.pdf/ (accessed 23 October 2015). In Rus.
13. Taghizadeh M., Eftekhari M. Improved Correlations for Prediction of Viscosity of Iranian Crude Oils. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2014, vol. 22, no. 3, pp. 346–354.
14. Sanchez-Minero F., Sanchez-Reyna G., Ancheyta J., Marroquin G. Comparison of correlations based on API gravity for predicting viscosity of crude oils. *Fuel*, 2014, vol. 138, pp. 193–199.
15. Kee R.J., Dixon-Lewis G., Warnatz J., Coltrin M.E., Miller J.A. A FORTRAN computer code package for the evaluation of gas-phase multicomponent transport properties. *SANDIA*, 1986. 39 p.
16. Davarzani H., Marcoux M., Costeseque P., Quintard M. Experimental measurement of the effective diffusion and thermodiffusion coefficients for binary gas mixture in porous media. *Chemical Engineering Science*, 2010, vol. 65, pp. 5092–5104.

17. Davarzani H., Marcoux M., Quintard M. Theoretical predictions of the effective thermodiffusion coefficients in porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, vol. 53, pp. 1514–1528.
18. Abbasi A., Saghir M.Z., Kawaji M. Study of thermodiffusion of carbon dioxide in binary mixtures of n-butane & carbon dioxide and n-dodecane & carbon dioxide in porous media. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011, vol. 50, pp. 124–132.
19. Bringuier E. Simple ideas about thermodiffusion in binary liquid mixture. *Comptes Rendus Mecanique*, 2013, vol. 341, pp. 365–371.
20. Srinivasan S., Saghir M.Z. Experimental approaches to study thermodiffusion – A review. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011, vol. 50, pp. 1125–1137.
21. Rahman M.A., Saghir M.Z. Ground based measurement and theoretical calculation of Soret coefficient of binary hydrocarbon mixtures. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, vol. 49, pp. 31–39.
22. Rahman M.A., Saghir M.Z. Thermodiffusion or Soret effect: Historical review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, vol. 73, pp. 693–705.
23. Eslamian M., Saghir M.Z., Bou-Ali M.M. Investigation of the Soret effect in binary, ternary and quaternary hydrocarbon mixtures: New expressions for thermodiffusion factors in quaternary mixtures. *International Journal of Thermal Sciences*, 2010, vol. 49, pp. 2128–2137.
24. *HYSYS Simulation Basis*. Aspen Technology, Inc., 2005. 527 p.
25. *HYSYS User Guide*. Aspen Technology, Inc., 2005. 533 p.
26. Peng D.Y., Robinson D.B. A new two-constant equation of state. *Ind. Eng. Chem. Fundam*, 1976, vol. 15, pp. 59–64.
27. Falovsky V.I., Khoroshev A.S., Shakhov V.G. The modern approach to phase-behavior predictions of hydrocarbon systems by means of the Peng–Robinson equation of state. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2011, vol. 13, no. 3, pp. 120–125. In Rus.
28. Kou J., Sun S. Unconditionally stable methods for simulating multi-component two-phase interface models with Peng–Robinson equation of state and various boundary conditions. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2016, vol. 291, pp. 158–182.
29. Kulik V.S., Chionov A.M., Korshunov S.A., Kazak K.A., Kazak A.S. Using various equations of state for calculating equilibrium in the systems «steam–liquid» under high pressure. *Truboprovodny transport: teoriya i praktika*, 2013, no. 3, pp. 8–12. In Rus.
30. Wilson G.M. A Modified Redlich–Kwong Equation of State, Application to General Physical Data Calculation. *AIChE Natl. Meeting*. Cleveland, Ohio, 1969.
31. Fominykh O.V. *Issledovanie fazovykh ravnovesiy uglevodorodov i obosnovanie metoda ikh rascheta dlya snizheniya poter nefti pri razrabotke mestorozhdeniy*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Research of phase equilibria of hydrocarbons and justification of the calculation method to reduce losses of oil at oil field development. Cand. Diss. Abstract]. Tyumen, 2001. 23 p.
32. Reid R.C., Prausnitz J.M., Sherwood T.K. *The Properties of Gases and Liquids*. New York, McGraw-Hill, 1977. 688 p.
33. Rachford H.H., Rice J.D. Procedure for Use of Electrical Digital Computers in Calculating Flash Vaporization Hydrocarbon Equilibrium. *Journal of Petroleum Technology*, 1952, vol. 4, pp. 19–20.
34. Akberov R.R. Osobennosti rascheta fazovogo ravnovesiya par–zhidkost mnogokomponentnykh sistem pri ispolzovanii uravneniya Soava–Redliha–Kvonga [Calculating the vapor–liquid phase equilibrium for multicomponent systems using the Soave–Redlich–Kwong equation]. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2011, vol. 45, no. 3, pp. 329–335.
35. Hirshfelder J.O., Curtis C.F., Bird R.B. *Molecular Theory of Gases and Liquids*. New York, John Wiley and Sons, 1954. 1219 p.
36. Golubev I.F. *Vjazkost gazov i gazovykh smesey* [Viscosity of gases and gas mixtures]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1959. 377 p.
37. Tee L.S., Gotoh S., Stewart W.E. Molecular parameters for normal fluids. Lennard–Jones 12–6 potential. *Ind. Eng. Chem. Fundam*, 1966, vol. 5, no. 3, pp. 356–363.
38. Reichenberg D. New methods for the estimation of the viscosity coefficients of pure gases at moderate pressures (with particular reference to organic vapors). *AIChE J.*, 1975, vol. 21, pp. 181–183.
39. Neufeld P.D., Janzen A.R., Aziz R.A. Empirical equations to calculate 16 of the transport collision integrals for the Lennard–Jones (12–6) potential. *J. Chem. Phys.*, 1972, vol. 57, pp. 1100–1102.
40. Anfimov N.A. Laminarny pogranchny sloy v mnogokomponentnoy smesi gazov [Laminar boundary layer in a multicomponent gas mixture]. *Izvestiya akademii nauk SSSR, Mekhanika i mashinostroenie*, 1962, no. 1, pp. 25–31.
41. Wilke C.R. A Viscosity Equation for Gas Mixtures. *The Journal of Chemical Physics*, 1950, vol. 18, pp. 517–519.
42. Wassiljewa A. Wärmeleitung in Gasgemischen [Thermal conductivity of gas mixtures]. *Physikalische Zeitschrift*, 1904, vol. 5, pp. 737–742.
43. Mason E.A., Saxena S.C. Approximate Formula for the Thermal Conductivity of Gas Mixtures. *Phys. Fluids*, 1958, vol. 1, pp. 361–369.
44. Tondon P.K., Saxena S.C. Thermal conductivity of ternary gas mixtures. *Chemical Physics Letters*, 1970, vol. 7, pp. 621–623.
45. Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Directory of thermal and physical properties of gases]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 720 p.
46. Bretshnayder S. *Svoystva gazov i zhidkostey* [Properties of gases and liquids]. Moscow, Leningrad, Khimiya Publ., 1966. 536 p.
47. Vilyams F.A. *Teoriya goreniya* [Combustion Theory]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 616 p.
48. De Groot S.R., Mazur P. *Non-Equilibrium Thermodynamics*. Amsterdam, North-Holland; New York, John Wiley and Sons, 1962. 510 p.
49. Kogan V.B. *Teoreticheskie osnovy tipovykh protsessov khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical engineering unit operations]. Leningrad, Khimiya Publ., 1977. 592 p.
50. Potekhin V.M., Potekhin V.V. *Osnovy teorii khimicheskikh protsessov tekhnologii organicheskikh veshchestv i neftepererabotki* [Foundations of chemical processes theory of organic matter and petroleum technology]. Saint Petersburg, Khimizdat Publ., 2007. 944 p.

Received: 12 July 2016.

Information about the authors

Eugenii V. Nikolayev, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

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

УДК 620.93:621.354

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ НА АЛЮМИНИЕВОМ ТОПЛИВЕ

Клер Александр Матвеевич¹,
kler@isem.irk.ru

Тюрина Элина Александровна¹,
tyurina@isem.irk.ru

Потанина Юлия Михайловна¹,
julia@isem.irk.ru

Медников Александр Станиславович¹,
mednikov@isem.irk.ru

¹ Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

Актуальность работы обусловлена использованием алюминия в качестве промежуточного энергоносителя для получения водорода, поскольку алюминий безопасен в обращении, затраты на транспорт и хранение алюминия относительно не велики, а дальнейшее использование полученного водорода характеризуется экологической чистотой продуктов сгорания.

Цель работы: определение энергетической эффективности, конструктивных характеристик основных элементов, капиталовложений в установки в зависимости от их термодинамических параметров и расходов рабочих тел.

Методы исследования. Поскольку исследования теплоэнергетических установок, использующих алюминий в качестве топлива, характеризуются многообразием физико-химических процессов, неопределенностью экономической информации и т. д., в качестве метода исследования авторы предлагают математическое моделирование данных установок с использованием программного пакета СМПП-ПК и проведение оптимизационных технико-экономических исследований на моделях. Оптимизация параметров проводилась в два этапа: на первом этапе максимизировался КПД установки, на втором минимизировались удельные капиталовложения в установку при полученном максимальном КПД.

Результаты. Разработаны технологические схемы газотурбинной установки с топливным элементом на алюминии, парогазовой установки с топливным элементом на водороде, газотурбинной установки на водороде с котлом-утилизатором. На основе технологических схем построены математические модели элементов и установок в целом. Проведены оптимизационные технико-экономические исследования на данных моделях. Энергоустановка с алюминиевыми топливными элементами может обеспечить весьма высокий КПД нетто – 65 %. КПД парогазовой установки с водородно-воздушными топливными элементами меньше КПД газотурбинной установки с топливными элементами на алюминии почти на 12 %, но в то же время удельные капиталовложения ниже. Газотурбинная установка на водороде с котлом-утилизатором имеет относительно низкие капиталовложения, но недостаточно высокий КПД нетто.

Ключевые слова:

Алюминий, водород, газотурбинная установка, парогазовая установка, топливный элемент.

Введение

На протяжении нескольких десятилетий учёные-энергетики занимаются исследованием водородной энергетики – глобальной энергетической системы, основным энергоносителем в которой является водород. Особую актуальность эти исследования приобретают в настоящее время в связи с обострившимися проблемами с выбросами парниковых газов и ожидаемым дефицитом углеводородного топлива [1–10].

Наряду с несомненными достоинствами, основным из которых является экологическая чистота продуктов сгорания, водород как энергоноситель имеет и существенные недостатки. Главные из них – дороговизна транспортировки и хранения [11–13]. В связи с этим несомненный научный интерес имеет поиск других возможных энергоносителей, обладающих достоинствами водорода, но лишённых его недостатков. Одним из таких энергоносителей является алюминий [14–18]. Продукт его окисления – твёрдое, нетоксичное вещество

Al_2O_3 . Алюминий имеет высокую теплотворную способность, легко и с малыми затратами хранится и транспортируется. Причём при его хранении и транспортировке не возникает таких опасностей (пожаров и взрывов), как при хранении и транспортировке водорода.

В общем виде технология использования алюминия как энергоносителя включает следующие стадии: а) производство алюминия с использованием «первичной» электроэнергии; б) транспортировка алюминия в район конечного потребления; в) складирование алюминия (для обеспечения неравномерного в годовом разрезе графика электрической нагрузки при равномерном производстве алюминия и его равномерном транспорте); г) производство «вторичной» электроэнергии из алюминия; д) обратный транспорт Al_2O_3 . Настоящая работа посвящена технико-экономическим исследованиям энергетических установок по получению электроэнергии на базе алюминиевого топлива как наименее изученному элементу указанной системы.

Состав вариантов исследуемых установок на «алюминиевом» топливе принимался, исходя из следующих соображений. Наиболее высокую энергетическую эффективность может обеспечить *комбинированная энергетическая установка*, в состав которой входят высокотемпературные топливные элементы на алюминии, в которых значительная часть химической энергии алюминия непосредственно переходит в электрическую энергию. Комбинация таких высокотемпературных топливных элементов с газотурбинной (ГТУ) или парогазовой установкой (ПГУ) может обеспечить коэффициент полезного действия установки более 65 %. Однако высокотемпературные топливные элементы на алюминии в настоящее время не являются в необходимой степени отработанными на практике источниками электроэнергии. В связи с этим рассматриваются две другие схемы производства электроэнергии из алюминия. Обе они включают промежуточную стадию получения из алюминия водорода на основе реакции алюминия с водяным паром: $2Al + 3H_2O \rightarrow Al_2O_3 + 3H_2$. Отметим, что данная реакция протекает с выделением значительного количества тепла.

В *первой схеме (ПГУ-ВТЭ)* в реактор подаётся стехиометрически необходимое для окисления поступающего в реактор алюминия количество водяного пара. В результате образуется практически чистый (за счёт образования Al_2O_3 в конденсированной фазе) водород, который поступает в высокотемпературные водородно-воздушные топливные элементы (ВТЭ). Выходящая из этих элементов смесь водяных паров, кислорода и азота направляется в газовую турбину. Тепло, выделяющееся в реакторе, идёт на производство острого пара и нагрев пара промперегрева паротурбинного цикла. Эта схема имеет достаточно высокий КПД, но требует расположения в реакторе с расплавленным алюминием дорогостоящих трубных поверхностей нагрева для передачи тепла рабочему телу паротурбинного цикла.

Вторая схема со сжиганием водорода в камере сгорания газовой турбины и получением пара, необходимого для производства водорода и отвода тепла в котле-утилизаторе (ГТУ-КУ), имеет более низкий КПД, но не требует расположения в реакторе трубных поверхностей нагрева и не предусматривает использование топливных элементов. В этой схеме в реактор пара подаётся больше, чем нужно для полного окисления поступающего алюминия. В результате из реактора выходит пароводородная смесь, которая «уносит» всё выделяющееся тепло. Это позволяет отказаться от размещения теплообменных поверхностей внутри реактора и существенно упрощает его конструкцию. Пароводородная смесь из реактора направляется в камеру сгорания газотурбинной установки, откуда продукты сгорания поступают в газовую турбину, а затем в котёл-утилизатор, где получается пар, направляемый в реактор.

Для каждой из исследуемых схем разработана математическая модель, позволяющая определить энергетическую эффективность, конструктивные характеристики основных элементов, капиталовложения в установку в зависимости от её термодинамических параметров и расходов рабочих тел. Математические модели были разработаны с помощью программно-вычислительного комплекса «Система машинного построения программ» (СМПП-ПК), который разработан в Институте систем энергетики им Л.А. Мелентьева СО РАН [19, 20]. Структура СМПП-ПК выбрана таким образом, чтобы охватить автоматизацией все наиболее важные этапы процесса математического моделирования сложных технологических систем. Данный комплекс позволяет автоматически генерировать программу расчета (на языке Fortran) сложной энергетической установки на основе графического изображения технологической схемы (построенного с помощью графического редактора СМПП-ПК) и архивов математических моделей ее элементов, а также формировать задачи оптимизации. Следует отметить, что математические модели установок состоят из сотен подсистем алгебраических, трансцендентных, дифференциальных уравнений и содержат тысячи переменных. С использованием этих моделей решались задачи оптимизации параметров установок. Причём оптимизация проводилась по критериям максимума КПД нетто и минимума удельных капиталовложений при максимальном КПД.

Технологические схемы установок

Технологическая схема ГТУ с АлТЭ. Технологическая схема теплоэнергетической установки, включающей высокотемпературные топливные элементы на алюминии, газотурбинную установку, регенеративный воздухоподогреватель и подсистему получения жидкого алюминия, представлена на рис. 1. Жидкий алюминий направляется на вход анода топливного элемента, на входе катода которого поступает воздух. С анода выходит твёрдый Al_2O_3 , а с катода – азотно-кислородная смесь. Часть газовой смеси поступает в систему нагрева и плавления алюминия, а затем на газовую турбину ГТ1. Остальная смесь сразу направляется на газовую турбину ГТ2. Отработавшая в газовых турбинах кислородно-водородная смесь поступает на воздухоподогреватель.

Технологическая схема ПГУ-ВТЭ. Упрощенная технологическая схема установки представлена на рис. 2. Установка включает реактор, в котором в результате реакции водяного пара с алюминием образуется газообразный водород и твёрдый Al_2O_3 . Кроме того, в реакторе выделяется значительное количество тепла (4187 ккал/кг на 1 кг алюминия). Процесс в реакторе протекает при температуре около 700 °С. Образующийся в реакторе водород направляется в высокотемпературный топливный элемент. Выделяющееся в реакторе тепло исполь-

зуется для нагрева и расплавления алюминия, получения острого пара в паровой турбине и нагрева пара промежуточного перегрева паровой турбины. В топливном элементе водород вступает в электрохимическую реакцию с кислородом воздуха. Образующаяся смесь водяных паров, поступающих с анода и азотно-кислородной смеси, поступающей с катода, направляется в газовую турбину, а затем нагревает воздух, предварительно сжатый в двух ступенях компрессора с промежуточным охлаждением. Воздух после регенеративного подогревателя поступает на катод топливного элемента.

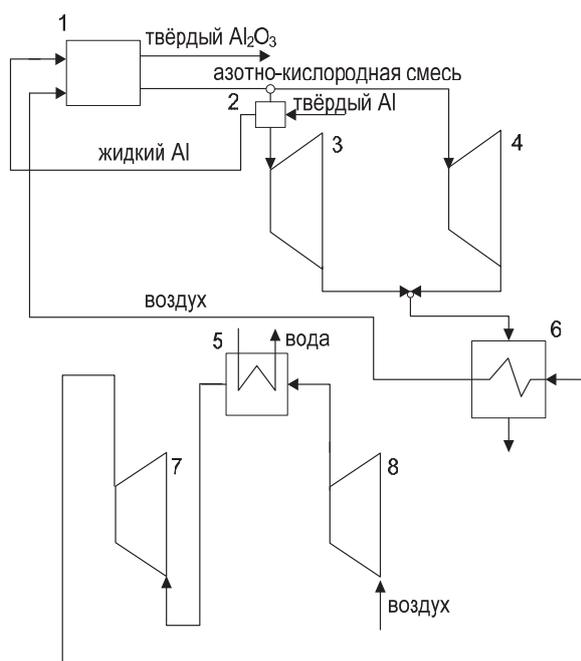


Рис. 1. Схема ГТУ с топливным элементом на алюминии: 1 – топливные элементы; 2 – теплообменник для нагрева и плавления алюминия; 3, 4 – газовые турбины; 5 – водовоздушный охладитель; 6 – воздухоподогреватель; 7, 8 – воздушные компрессоры

Fig. 1. Scheme of a gas-turbine installation (GTI) with aluminum fuel cell: 1 are the fuel cells; 2 is the heat exchanger for aluminum heating and melting; 3, 4 are the gas turbines; 5 is the water-air cooler; 6 is the air heater; 7, 8 are the air compressors

Паровая турбина имеет «стандартную» технологическую схему и включает три регенеративных подогревателя высокого давления (с выделенными зонами охлаждения пара и охлаждения конденсата), термический деаэратор 6 кг/см², четыре регенеративных подогревателя низкого давления и конденсатор.

Технологическая схема ГТУ-КУ. Схема ГТУ на водороде с котлом-утилизатором представлена на рис. 3. Смесь водяного пара и водорода из реактора 4 направляется в камеру сгорания газовой турбины. Туда же поступает воздух, сжимаемый компрессором 1. Смесь азота, кислорода и водяных паров из газовой турбины 3 поступает в котёл-утилизатор 5. Вода в котёл-утилизатор подаётся насосом

6. Пар из котла-утилизатора направляется в реактор, где в результате его взаимодействия с расплавленным алюминием получается пароводородная смесь.

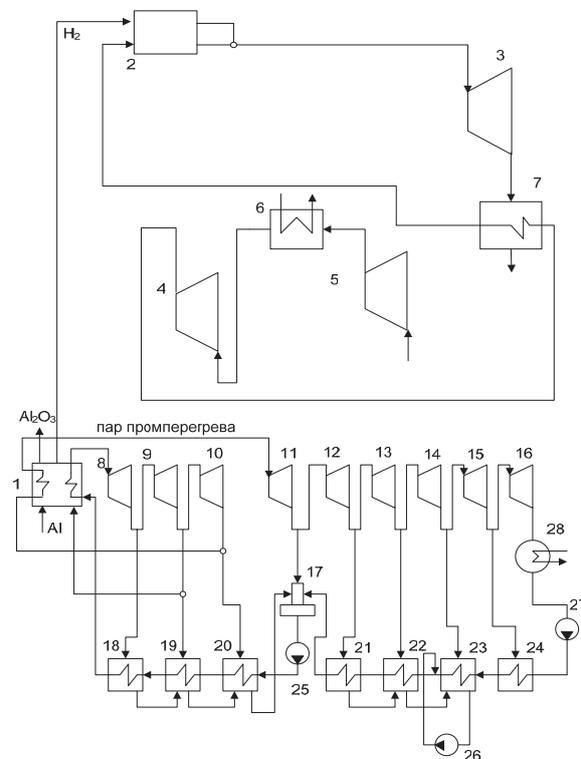


Рис. 2. Схема ПГУ с топливным элементом на водороде: 1 – реактор получения водорода; 2 – топливный элемент; 3 – газовая турбина; 4, 5 – воздушные компрессоры; 6 – водовоздушный охладитель; 7 – газозо-воздушный теплообменник; 8–16 – отсеки паровой турбины; 17 – деаэратор; 18–20 – подогреватели высокого давления; 21–24 – подогреватели низкого давления; 25–27 – насосы; 28 – конденсатор паровой турбины

Fig. 2. Scheme of combined-cycle plant (CCP) with hydrogen fuel cell: 1 is the reactor for hydrogen production; 2 is the fuel cell; 3 is the gas turbine; 4 and 5 are the air compressors; 6 is the water-air cooler; 7 is the gas-air heat exchanger; 8–16 are the steam turbine compartments; 17 is the deaerator; 18–20 are the high pressure heaters; 21–24 are the low pressure heaters; 25–27 are the pumps; 28 is the steam turbine condenser

Математические модели основных элементов установок

Математическая модель алюминиевого высокотемпературного топливного элемента. Топливный элемент состоит из двух электродов, между которыми расположен твёрдый электролит. К электродам подводится топливо (к аноду) и окислитель (к катоду). В рассматриваемом элементе в качестве топлива используется жидкий алюминий, а в качестве окислителя – кислород воздуха. На аноде протекает реакция окисления восстановителя, на катоде – восстановления окислителя. Ионным проводником служит твердое вещество.

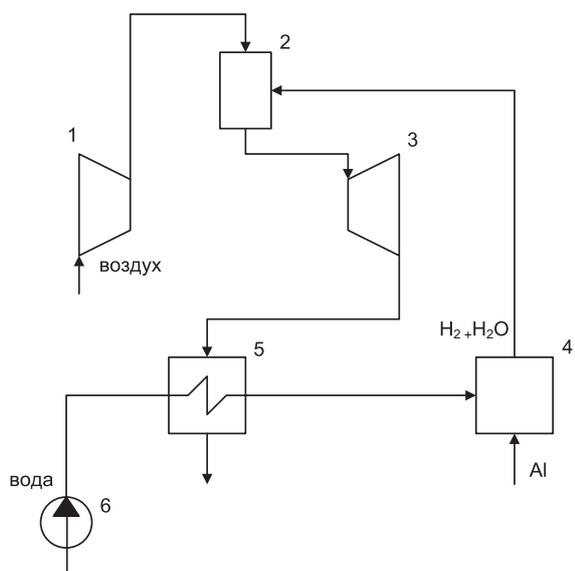


Рис. 3. Схема газотурбинной установки на водороде, полученном из алюминия (ГТУ-КУ): 1 – воздушный компрессор; 2 – камера сгорания; 3 – газовая турбина; 4 – реактор получения водорода из алюминия; 5 – котел-утилизатор; 6 – насос

Fig. 3. Scheme of GTI on hydrogen produced from aluminum (GTI with waste heat boiler – WHB): 1 is the air compressor; 2 is the combustion chamber; 3 is the gas turbine; 4 is the reactor for hydrogen production from aluminum; 5 is the waste heat boiler; 6 is the pump

С анода выходит Al_2O_3 , а с катода – азотно-кислородная смесь с меньшей по сравнению с воздухом долей кислорода. Количество воздуха, поступающего на катод АлТЭ, должно быть подобрано таким образом, чтобы отвод тепла от АлТЭ с выходящей с катода азотно-кислородной смесью обеспечил поддержание теплового баланса элемента на допустимом температурном уровне. Принято, что топливный элемент работает при изобарно-изотермических условиях. Для этих условий максимальная работа, которая может быть получена в системе при обратимом протекании химической реакции A_{\max} , равна изменению энергии Гиббса с обратным знаком:

$$A_{\max} = -\Delta G.$$

Полезная работа ТЭ определяется как

$$A_{\text{ТЭ}} = A_{\max} \eta_{oi},$$

где η_{oi} – внутренний относительный КПД ТЭ.

ΔG определяется из выражения

$$\Delta G = G_{\text{вх}}^a + G_{\text{вх}}^k - G_{\text{вых}}^a - G_{\text{вых}}^k,$$

где $G_{\text{вх}}^a, G_{\text{вх}}^k$ – энергия Гиббса потоков на входе анода и катода; $G_{\text{вых}}^a, G_{\text{вых}}^k$ – энергия Гиббса потоков на выходе анода и катода.

В процессах, протекающих в топливных элементах, выделяется тепло, которое находится из уравнения теплового баланса:

$$Q_{\text{ТЭ}} = H_{\text{вх}}^a + H_{\text{вх}}^k - A_{\text{ТЭ}} - H_{\text{вых}}^a - H_{\text{вых}}^k,$$

где $H_{\text{вх}}^a, H_{\text{вх}}^k, H_{\text{вых}}^a, H_{\text{вых}}^k$ – полные энтальпии вещества на входе и выходе анода и катода.

С учётом того, что всё выделившееся в ТЭ тепло отводится с потоками веществ с катода и анода, то условием теплового баланса ТЭ при температуре реакции T^p является

$$Q_{\text{ТЭ}} = 0.$$

Это условие в модели используется для определения температуры реакции, при которой Al_2O_3 выходит с анода, а газовая смесь – с катода.

Расход Al_2O_3 на выходе анода

$$G_{\text{вых.а}}^{\text{Al}_2\text{O}_3} = G^{\text{Al}} \mu_{\text{Al}_2\text{O}_3} / (2\mu_{\text{Al}}),$$

где G^{Al} – расход алюминия на входе анода; $\mu_{\text{Al}}, \mu_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ – молекулярные веса Al и Al_2O_3 .

Количество кислорода, поступающего с катода через электролит на анод, определяется из стехиометрического соотношения:

$$G_{\text{к-а}}^{\text{O}_2} = G^{\text{Al}} (3/2) \mu_{\text{O}_2} / (2\mu_{\text{Al}}),$$

где μ_{O_2} – молекулярный вес O_2 .

Расход кислорода на выходе катода Al_2O_3

$$G_{\text{вых.к}}^{\text{O}_2} = G_{\text{вх.к}}^{\text{O}_2} - G_{\text{к-а}}^{\text{O}_2},$$

где $G_{\text{вх.к}}^{\text{O}_2}$ – расход кислорода на входе катода.

Расход азота на выходе катода равен его расходу на входе:

$$G_{\text{вх.к}}^{\text{N}_2} = G_{\text{вых.к}}^{\text{N}_2}.$$

Математическая модель подсистемы получения жидкого алюминия. Модель предназначена для определения количества тепла, которое должно быть отведено от азотно-кислородной смеси, выходящей с катода ТЭ для нагрева твёрдого алюминия до температуры плавления и последующего его расплавления. Находится температура газовой смеси после отвода от нее тепла и расход смеси, необходимый для нагрева и расплавления алюминия.

Тепло, необходимое для нагрева и расплавления алюминия, определяется из выражения

$$Q_{\text{НП}} = G^{\text{Al}} (r_{\text{Al}}^{\text{пл}} + c_{\text{Al}} (t_{\text{Al}}^{\text{пл}} - t_{\text{Al}}^{\text{вх}})),$$

где $r_{\text{Al}}^{\text{пл}}$ – теплота плавления алюминия; c_{Al} – весовая теплоемкость твёрдого алюминия; $t_{\text{Al}}^{\text{пл}}$ – температура плавления алюминия; $t_{\text{Al}}^{\text{вх}}$ – температура, с которой твёрдый алюминий поступает в установку.

Расход газовой смеси определяется из условия, чтобы температура газа на выходе из зоны плавления алюминия была на заданную величину (принятую равной 30°C) выше температуры плавления алюминия:

$$G_{\text{акс}} = \frac{G^{\text{Al}} r_{\text{Al}}^{\text{пл}}}{c_{\text{акс}} [t_{\text{ак}}^{\text{выхТЭ}} - (t_{\text{Al}}^{\text{пл}} + 30)]},$$

где $c_{\text{акс}}$ – удельная весовая теплоёмкость азотно-кислородной смеси.

Температура азотно-кислородной смеси после подсистемы получения жидкого алюминия

$$t_{\text{ак}}^{\text{вых}} = t_{\text{ак}}^{\text{выхТЭ}} - \frac{Q_{\text{НП}}}{G_{\text{акс}} C_{\text{акс}}},$$

где $t_{\text{ак}}^{\text{выхТЭ}}$ – температура азотно-кислородной смеси на входе в подсистему получения жидкого алюминия или на выходе топливных элементов.

Математическая модель реактора для получения водорода из алюминия. Расчёты термодинамического равновесия для реакции получения водорода из алюминия



показали, что данная реакция идёт в сторону получения H_2 и Al_2O_3 практически вплоть до исчерпания одного из исходных веществ этой реакции. Это позволяет построить математическую модель реактора на основе стехиометрических балансовых соотношений, а также уравнений энергетического баланса. Исходя из этого, в модель были включены нижеследующие зависимости.

Тепловая энергия, требующаяся на расплавление алюминия и нагрев его до температуры реакции

$$Q_{\text{Al}} = [(t_{\text{пл}} - t_{\text{вх}})N_T + (t_R - t_{\text{пл}})N_{\text{ж}} + Q_{\text{пл}}]G_{\text{Al}},$$

где $t_{\text{пл}}$ – температура плавления алюминия; $t_{\text{вх}}$ – температура твёрдого алюминия на входе в установку; t_R – температура реакции; C_T , $C_{\text{ж}}$ – весовая теплоёмкость твёрдого и жидкого алюминия; $Q_{\text{пл}}$ – теплота плавления алюминия; G_{Al} – расход алюминия.

Стехиометрически необходимый расход воды:

$$G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{S}} = G_{\text{Al}} \left(\frac{\mu_{\text{O}_3}^{\text{Al}_2\text{O}_3}}{\mu_{\text{Al}_2}^{\text{Al}_2\text{O}_3}} \right) \left(\frac{\mu_{\text{H}_2\text{O}}}{\mu_{\text{O}_2}^{\text{H}_2\text{O}}} \right) = G_{\text{Al}} \left(\frac{48}{54} \right) \left(\frac{18}{16} \right) = G_{\text{Al}},$$

где $\mu_{\text{O}_3}^{\text{Al}_2\text{O}_3}$ – суммарный атомарный вес атомов кислорода, входящих в молекулу; $\mu_{\text{Al}_2}^{\text{Al}_2\text{O}_3}$ – суммарный атомарный вес атомов алюминия, входящих в молекулу; $\mu_{\text{H}_2\text{O}}$ – молекулярный вес воды; $\mu_{\text{O}_2}^{\text{H}_2\text{O}}$ – суммарный атомарный вес атомов кислорода, входящих в молекулу воды.

Тепловая энергия, идущая на нагрев водяного пара до температуры в реакторе

$$Q_{\text{H}_2\text{O}} = G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{S}} (H_R - H_{\text{вх}}),$$

где H_R – энтальпия водяных паров при температуре реакции; $H_{\text{вх}}$ – энтальпия водяных паров на входе в реактор.

Расход водорода из реактора определяется как

$$G_{\text{H}_2} = G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{S}} \frac{\mu_{\text{H}_2}^{\text{H}_2\text{O}}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}}} = G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{S}} \left(\frac{2}{18} \right) = G_{\text{Al}} \left(\frac{2}{18} \right),$$

где $\mu_{\text{H}_2}^{\text{H}_2\text{O}}$ – суммарный атомарный вес водорода в молекуле воды.

Образование Al_2O_3 в реакторе

$$G_{\text{Al}_2\text{O}_3} = G_{\text{Al}} \left(\frac{\mu_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{\mu_{\text{Al}_2}^{\text{Al}_2\text{O}_3}} \right),$$

где $\mu_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ – молекулярный вес Al_2O_3 .

Энергетический баланс реактора имеет вид

$$H_{\text{вых}}^{\text{n}} - H_{\text{вх}}^{\text{n}} = Q_{\text{Al}} + Q_{\text{H}_2\text{O}} + Q_W,$$

где Q_W – тепло, отводимое от реактора острым паром и паром промперегрева паротурбинного цикла; $H_{\text{вых}}^{\text{n}}$, $H_{\text{вх}}^{\text{n}}$ – полные энтальпии выходных продуктов реактора (H_2 и Al_2O_3) и входных продуктов (Al и H_2O) при температуре реакции.

Тепло, отводимое паром паротурбинного цикла, определяется из выражения

$$Q_W = G^{\circ} (i^{\circ} - i^{\text{пв}}) + G^{\text{пв}} (i_{\text{вых}}^{\text{пв}} - i_{\text{вх}}^{\text{пв}}),$$

где G° – расход острого пара; $G^{\text{пв}}$ – расход пара промежуточного перегрева; i° – энтальпия острого пара; $i^{\text{пв}}$ – энтальпия питательной воды; $i_{\text{вых}}^{\text{пв}}$, $i_{\text{вх}}^{\text{пв}}$ – выходная (из реактора) и входная (в реактор) энтальпии пара промперегрева.

Площади теплообменных поверхностей внутри реактора определяются на основе уравнений теплопередачи. Причём расчёты проводятся по отдельности для экономайзерной, испарительной и перегревательной зон (для острого пара) и перегревательной зоны для пара промперегрева.

Для реактора, не имеющего встроенных поверхностей нагрева, из выражения энергетического баланса исключается Q_W , а при определении $H_{\text{вых}}^{\text{n}}$, $H_{\text{вх}}^{\text{n}}$, $Q_{\text{H}_2\text{O}}$ учитывается дополнительный (сверхстехиометрически необходимый) расход воды.

Математические модели газовой турбины, воздушного компрессора, камеры сгорания газовой турбины, отсеков паровой турбины, котла утилизатора, водовоздушного охладителя, деаэрата, газовоздушного теплообменника и т. д. представлены в [20].

Результаты оптимизационных исследований энергетических установок, использующих алюминий в качестве топлива

Оптимизация проводилась в два этапа, в соответствии с изложенной в [21] методикой. На первом этапе максимизировался КПД установки, на втором – минимизировались удельные капиталовложения в установку при полученном максимальном КПД. Целесообразность такого подхода обусловлена тем, что цена алюминиевого топлива вторичных ТЭС весьма высока и в этих условиях технические решения, обеспечивающие максимальную энергетическую эффективность, будут обеспечивать и максимальную экономическую эффективность.

В состав оптимизируемых параметров входили: для ГТУ с АлТЭ – расход воздуха на входе катода, концевой температурный напор на входе газа в регенеративный воздухоподогреватель, массовая скорость воды в воздухоохладителе, температурный напор в теплообменнике для нагрева и плавления алюминия; для ПГУ с ВТЭ – расход газа на входе катода, температура газа на входе анода, концевой температурный напор и давление газа на входе в

воздухоподогреватель, давление воздуха на выходе из компрессоров, расход, энтальпия и давление перегретого пара, давление и энтальпия пара промпрегрева, давление пара на выходе из отсеков паровой турбины; для ГТУ-КУ – температура и давление в реакторе и температура газовой смеси на входе в газовую турбину, энтальпия пара на выходе из КУ, расход воды на входе в КУ. Учитывались ограничения на механическое напряжение и температуру металла труб теплообменников, температуру газа на выходе из топливного элемента и др.

Таблица 1. Исходная технико-экономическая информация

Table 1. The initial technical and economic data

Показатель, размерность Index and units	Значение Value
Температура твёрдого алюминия на входе в установку, °С Temperature of solid aluminum at installation inlet, °C	30
Внутренний относительный КПД топливного элемента, % Internal relative efficiency of fuel cell (FC), %	75
Стоимость алюминия, долл./т Cost of aluminum, dol./t	1500
Удельная стоимость металла труб теплообменников из перлитной стали, тыс. долл./т Specific cost of tube metal for heat exchangers made of perlitic steel, thous. dol./t	31
Удельная стоимость металла труб теплообменников из аустенитной стали, тыс. долл./т Specific cost of tube metal for heat exchangers made of austenitic steel, thous. dol./t	54
Удельная стоимость воздушных компрессоров, долл./кВт Specific cost of air compressors, dol./kW	45
Удельная стоимость газовой турбины, долл./кВт Specific cost of gas turbine, dol./kW	60
Удельная стоимость систем технического водоснабжения, тыс. долл./МВт Specific cost of systems for service water supply, thous. dol./MW	35
Доля затрат на монтаж оборудования от его изготовления, % Share of costs for equipment installation in its manufacturing, %	15
Доля стоимости неучтенного оборудования, % Share of cost of unaccounted equipment, %	20
Удельная стоимость электрооборудования собственных нужд, долл./кВт Specific cost of equipment for auxiliary power supply, dol./kW	20
Стоимость строительной части ГТУ мощностью 400 МВт, тыс. долл. Cost of construction of 400 MW GTI, thous. dol.	69400
Удельная стоимость систем, зависящих от расхода топлива, тыс. долл./ (т/ч) Specific cost of systems depending on fuel consumption, thous. dol./ (t/h)	100
Удельная стоимость систем, зависящих от электрической мощности, тыс. долл./МВт Specific cost of systems depending on electric power, thous. dol./MW	192

Оптимизационные технико-экономические исследования трёх указанных типов установок на алюминии проводились при его одинаковом расходе, равном 25 кг/с. Исходная технико-экономическая информация, использованная при оптимизационных расчётах, представлена в табл. 1. Основные результаты исследований представлены в табл. 2–4.

Таблица 2. Основные результаты оптимизационных расчётов ГТУ с АлТЭ

Table 2. Main results of optimization calculations of GTI with aluminum fuel cell (AIFC)

Показатель, размерность Index and units	Значение Value
Температура газа на выходе с катода ТЭ, °С Gas temperature at the outlet of FC cathode, °C	969,1
Температура газа на входе, °С Gas temperature at the inlet, °C	
в ГТ1/to GT1	697,7
в ГТ2/to GT2	969,1
в воздухоподогреватель/to air heater	404,6
Температура газа на выходе из воздухоподогревателя, °С Gas temperature at the air heater outlet, °C	279,0
Расход воздуха на входе в ТЭ, кг/с Air flow rate at the FC inlet, kg/s	724,0
Давление воздуха на входе в ТЭ, МПа Air pressure at the FC inlet, MPa	0,71
Температура воздуха, °С Air temperature, °C	
на выходе из компрессора первой ступени (КВ1) at the outlet of compressor of stage 1 (AC1)	154,2
на выходе из воздухоохладителя at the air cooler outlet	30,0
выходе из компрессора второй ступени (КВ2) at the outlet of compressor of stage 2 (AC2)	130,0
Расход газа через ГТ1, кг/с Gas flow rate through GT1, kg/s	669,7
Расход газа через ГТ2, кг/с Gas flow rate through GT2, kg/s	34,2
Мощность, МВт: Capacity, MW:	
ТЭ/FC	392,5
ГТ1/GT1	221,0
ГТ2/GT2	14,5
КВ1/AC1	75,5
КВ2/AC2	94,2
Площадь поверхности нагрева, м ² : Heating surface area, m ² :	
воздухоподогревателя/air heater	15390,0
воздухоохладителя/air cooler	1790,0
Полезная мощность установки, МВт Useful capacity of installation, MW	457,5
Удельные капиталовложения в установку, долл./кВт, при удельной стоимости изготовления топливных элементов: Specific investments in installation, dol./kW at the specific cost of fuel cell production:	
500 долл./кВт (dol./kW)	1225,0
1000 долл./кВт (dol./kW)	1810,0
КПД нетто установки, % Net efficiency of installation, %	65,0

Таблица 3. Основные результаты оптимизационных расчётов схемы ПГУ с ВТЭ

Table 3. Main results of optimization calculations of CCI with HFC

Показатель, размерность Index and units	Значение Value
Расход водорода на входе в ТЭ, кг/с Hydrogen flow rate at the FC inlet, kg/s	2,75
Расход острого пара на входе в реактор, кг/с Live steam flow rate at the reactor inlet, kg/s	160,5
Расход пара промперегрева на входе в реактор, кг/с Steam flow rate of reheat at the reactor inlet, kg/s	96,8
Расход водяного пара на входе в реактор, кг/с Flow rate of water steam at the reactor inlet, kg/s	24,75
Давление газа перед газовой турбиной, МПа Gas pressure before the gas turbine, MPa	1,54
Температура воздуха на входе в ТЭ, °С Air temperature at the FC inlet, °C	689,0
Температура острого пара, °С Live steam temperature, °C	575,0
Температура пара промперегрева, °С Reheat steam temperature, °C	540,0
Давление острого пара, МПа Live steam pressure, MPa	18,5
Давление пара промперегрева, МПа Reheat steam pressure, MPa	2,02
Расход воздуха на входе в ТЭ, кг/с Air flow rate at the FC inlet, kg/s	207,0
Вес труб воздухоподогревателя, т Weight of air heater tubes, t	296,0
Температура газа на входе в газовую турбину, °С Gas temperature at the gas turbine inlet, °C	1300,0
Температура газа на выходе из воздухоподогревателя, °С Gas temperature at the air heater outlet, °C	273,2
Мощность топливного элемента, МВт Fuel cell capacity, MW	158,8
Мощность паровой турбины, МВт Steam turbine capacity, MW	183,1
Мощность газовой турбины, МВт Gas turbine capacity, MW	157,0
Мощность воздушных компрессоров, МВт Air compressor capacity, MW	72,3
Мощность насосов паротурбинной установки, МВт Capacity of steam-turbine installation pumps, MW	3,8
Полезная мощность установки, МВт Useful capacity of installation, MW	422,7
Удельные капиталовложения в установку, долл./кВт, при удельной стоимости изготовления топливных элементов: Specific investments in installation, dol./kW at the specific cost of fuel cell production:	
500 долл./кВт (dol./kW)	924,4
1000 долл./кВт (dol./kW)	1271,5
КПД нето установки, % Net efficiency of installation, %	53,1

Заключение

Как отмечалось, основной целью настоящей работы являлись технико-экономические исследования энергетических установок по получению электр

Таблица 4. Основные результаты оптимизационных расчётов схемы ГТУ с КУ

Table 4. Main results of optimization calculations of gas turbine installation on hydrogen with the waste heat boiler

Показатель, размерность Index and units	Значение Value
Температура газа на входе в газовую турбину, °С Gas temperature at the gas turbine inlet, °C	1500,0
Температура водорода на входе в камеру сгорания, °С Hydrogen temperature at the combustion chamber inlet, °C	1226,0
Давление газа на входе в газовую турбину, МПа Gas pressure at the gas turbine inlet, MPa	3,92
Давление водорода на входе в камеру сгорания, МПа Hydrogen pressure at the combustion chamber inlet, MPa	3,99
Давление пара на входе в реактор, МПа Steam pressure at the reactor inlet, MPa	3,99
Температура пара на входе в реактор, °С Steam temperature at the reactor inlet, °C	249,1
Температура уходящих газов, °С Temperature of exhaust gases, °C	100,0
Расход пара на входе в реактор, кг/с Steam flow rate at the reactor inlet, kg/s	151,2
Температура воздуха на входе в камеру сгорания, °С Air temperature at the combustion chamber inlet, °C	621,0
Расход воздуха на входе в камеру сгорания, кг/с Air flow rate at the combustion chamber inlet, kg/s	227,4
Мощность газовой турбины, МВт Gas turbine capacity, MW	460,0
Полезная мощность установки, МВт Useful capacity of installation, MW	311,8
Удельные капиталовложения в установку, долл./кВт Specific investments in installation, dol./kW	670,0
КПД установки, % Installation efficiency, %	39,2

троэнергии на базе алюминиевого топлива как наименее изученных элементов включающих их энергетических систем. В соответствии с этим разработаны технологические схемы ГТУ с АлТЭ, ПГУ с ВТЭ и ГТУ с КУ. Построены математические модели алюминиевого высокотемпературного топливного элемента, подсистемы получения жидкого алюминия, реактора для получения водорода из алюминия, установок в целом. Проведены оптимизационные технико-экономические исследования ГТУ с АлТЭ, ПГУ с ВТЭ и ГТУ с КУ с использованием разработанных математических моделей. В результате получены основные технико-экономические показатели рассматриваемых энергоустановок на основе алюминиевого топлива.

Как видно из представленных результатов расчётов (табл. 2), энергоустановка с алюминиевыми топливными элементами может обеспечить весьма высокий КПД нето (65 %) при простой технологической схеме. В то же время получение приемлемого уровня удельных капиталовложений возможно лишь в случае достаточно низкой удельной стоимости собственно топливных элементов, работающих на алюминии (500 долл./кВт).

КПД ПГУ с ВТЭ (табл. 3) меньше КПД ГТУ с АлТЭ почти на 12 %, но в то же время удельные капиталовложения ниже в среднем на

300–600 долл./кВт в зависимости от стоимости топливного элемента. В схеме ГТУ с ВТЭ (табл. 4) обеспечиваются относительно низкие капиталовложения, но недостаточно высокий КПД нетто.

Таким образом, разработаны технико-экономические основы для дальнейших исследований энергетических систем, использующих в качестве энергоносителя алюминий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rifkin J. The Hydrogen Economy: the Creation of the Worldwide Energy Web and the Redistribution of Power on Earth. – New York: Penguin Group, 2003. – 285 p.
2. Kundu P.P., Dutta K. Hydrogen fuel cells for portable applications // Compendium of Hydrogen Energy. – 2016. – № 4. – P. 111–131.
3. Hydrogen production from catalytic steam reforming of benzene as tar model compound of biomass gasification / Ningbo Gao, Xiaowang Wang, Aimin Li, Chunfei Wu, Zhifan Yin // Fuel Processing Technology. – 2016. – № 148. – P. 380–387.
4. Hydrogen: the future energy carrier / A. Zuttel, A. Remhof, A. Borgschulte, O. Friedrichs // Philosophical Transaction of the Royal Society A. – 2010. – V. 368 (1923). – P. 3329–3342.
5. LeValley T.L., Richard A.R., Maohong Fan. Development of catalysts for hydrogen production through the integration of steam reforming of methane and high temperature water gas shift // Energy. – 2015. – № 90. – P. 748–758.
6. Stiegel G.J., Ramezan M. Hydrogen from coal gasification: an economical pathway to a sustainable energy future // International Journal of Coal Geology. – 2011. – № 65. – P. 173–190.
7. Godula-Jopek A., Westenberger A. Hydrogen-fueled aeroplanes // Compendium of Hydrogen Energy. – 2016. – № 4. – P. 67–85.
8. Hill P., Penev M. Hydrogen Fueling Station in Honolulu, Hawaii Feasibility Analysis // Idaho National Laboratory Idaho Falls, Idaho 83415. – 2014. URL: http://energy.gov/sites/prod/files/2014/08/f18/fcto_h2_fueling_station_honolulu_feasibility_analysis.pdf (дата обращения: 10.09.2015).
9. Decourt B., Debarre R., Soupa O. Making the Case for Hydrogen-Based Energy Storage // Energy Perspectives. – 2013. – V. 3. – P. 18–25.
10. Hydrogen storage in rippled graphene: perspectives from multi-scale simulations / V. Camiola, R. Farchioni, T. Cavallucci, A. Rossi, V. Pellegrini, V. Tozzini // Front. Mater. – 2015. DOI: 10.3389/fmats.2015.00003.
11. Applied hydrogen storage research and development: a perspective from the U.S. Department of Energy / K. OrMalley, G. Ordaz, J. Adams, K. Randolph, Ch.C. Ahn, N.T. Stetson // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – № 645. – P. S419–S422.
12. Marino C., Nucara A., Pietrafesa M. Electrolytic Hydrogen Production from Renewable Source, Storage and Reconversion in Fuel Cells: the System of the «Mediterranea» University of Reggio Calabria // Energy Procedia. – 2015. – № 78. – P. 818–823.
13. Yang S., Knickle H. Design and Analysis of Aluminum/Air battery system for electrical vehicles // Journal of power sources. – 2002. – V. 112. – P. 162–173.
14. Экспериментальная когенерационная энергетическая установка на основе гидротермального окисления алюминия / М.С. Влашкин, Е.И. Школьников, А.В. Берш, А.З. Жук, А.В. Лисицын, А.И. Сороковиков, Ю.В. Панкина // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2011. – № 6. – С. 31–45.
15. О возможности практического использования реакции окисления дисперсного алюминия жидкой водой / М.Н. Ларичев, О.О. Ларичева, Н.С. Шайтура, Е.И. Школьников // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2012. – № 3. – С. 66–79.
16. Qingfeng Li, Niels J. Bjerrum. Aluminum as anode for energy storage and conversion: a review // Journal of Power Sources. – 2002. – V. 110. – P. 1–10.
17. Hydrogen Generation by Treatment of Aluminium Metal with Aqueous Solutions: Procedures and Uses / J. Olivares-Ramirez, A. Marroquin de Jesús, O. Jiménez-Sandoval, R. Pless // Hydrogen Energy – Challenges and Perspectives / Ed. by prof. Dragica Minic. InTech, 2012. – P. 56–76. URL: <http://www.intechopen.com/books/hydrogen-energy-challenges-and-perspectives/hydrogen-generation-by-treatment-of-aluminium-metal-with-aqueous-solutions-procedures-and-uses> (дата обращения: 01.06.2016).
18. Micro-fuel cells – current development and applications / A. Kundu, J.H. Jang, J.H. Gil, C.R. Jung, H.R. Lee, S.H. Kim, Y.S. Oh // Journal of Power Sources. – 2007. – № 170 (1). – P. 67–78.
19. Математическое моделирование и оптимизация в задачах оперативного управления тепловыми электростанциями / А.М. Клер, Н.П. Деканова, С.К. Скрипкин и др. – Новосибирск: Наука, Сиб. предприятие РАН, 1997. – 120 с.
20. Kler A.M., Maximov A.S., Stepanova E.L. Mathematical modeling and optimization of large thermal power installations // Proceedings of the ASME-ATI-UIT 2010 Conference Thermal and Environmental Issues in Energy Systems. – Sorrento, Italy: Hilton Sorrento Palace, 2010. – P. 391–394.
21. Клер А.М., Потанина Ю.М. Технико-экономические оптимизационные исследования перспективных теплоэнергетических установок // Перспективы энергетики. – 2002. – № 4. – С. 385–398.

Поступила 06.06.2016 г.

Информация об авторах

Клер А.М., доктор технических наук, профессор, заведующий отделом теплосиловых систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

Тюрин Э.А., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник отдела теплосиловых систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

Потанина Ю.М., кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела теплосиловых систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

Медников А.С., кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела теплосиловых систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

UDC 620.93:621.354

PERSPECTIVE POWER PLANTS ON ALUMINIUM FUEL

Aleksandr M. Kler¹,
kler@isem.irk.ru

Elina A. Tyurina¹,
tyurina@isem.irk.ru

Yulia M. Potanina¹,
julia@isem.irk.ru

Aleksandr S. Mednikov¹,
mednikov@isem.irk.ru

¹ Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
130, Lermontov Street, Irkutsk, 664033, Russia.

The relevance of the discussed problem is caused by use of aluminum as an intermediate source of energy to produce hydrogen, because aluminum is safe to use, transport and storage cost of aluminum is relatively low, and further use of the produced hydrogen is characterized by ecologically clean products of combustion.

The main aim of the study is to determine energy efficiency characteristics of the main constructional elements, investment in installations depending on their thermodynamic parameters and working medium flows.

The methods used in the study. The studies of thermal power plants using aluminum as fuel are characterized by a variety of physical and chemical processes, the uncertainty of economic information, etc., therefore, the authors propose the mathematical modeling of these systems using the software package SMPP PC as a method of study and optimization feasibility researches by models. The parameters were optimized in two stages: the first stage is maximization of the plant efficiency, and the second stage is minimization of specific capital investment in the installation when the efficiency is maximum.

The results. The authors developed the technological schemes of gas-turbine installation with an aluminum fuel element, steam-gas installation with a hydrogen fuel element, hydrogen gas-turbine installation with exhaust heat boiler. The mathematical models of elements and installations in general based on technological schemes were constructed. Optimizing technical and economic researches on these models were carried out. Energy installations with aluminum fuel cells can provide very high net efficiency – 65 %. Energy efficiency of the combined-cycle installation with the hydrogen-air fuel cell is about 12 % less than the efficiency of a gas turbine installation with aluminum fuel cells, but at the same time in this case the capital investments are lower. Gas turbine installation on hydrogen with the waste heat boiler has relatively low capital investments, but not high enough level of net efficiency.

Key words:

Aluminum, hydrogen, gas turbine installation, combined-cycle installation, fuel cell.

REFERENCES

- Rifkin, J. *The Hydrogen Economy: the Creation of the Worldwide Energy Web and the Redistribution of Power on Earth*. New York, Penguin Group, 2003. 285 p.
- Kundu P.P., Dutta K. Hydrogen fuel cells for portable applications. *Compendium of Hydrogen Energy*, 2016, no. 4, pp. 111–131.
- Ningbo Gao, Xiao Wang, Aimin Li, Chunfei Wu, Zhifan Yin. Hydrogen production from catalytic steam reforming of benzene as tar model compound of biomass gasification. *Fuel Processing Technology*, 2016, no. 148, pp. 380–387.
- Zuttel A., Remhof A., Borgschulte A., Friedrichs O. Hydrogen: the future energy carrier. *Philosophical Transaction of the Royal Society A*, 2010, no. 368 (1923), pp. 3329–3342.
- LeValley T.L., Richard A.R., Maohong Fan. Development of catalysts for hydrogen production through the integration of steam reforming of methane and high temperature water gas shift. *Energy*, 2015, no. 90, pp. 748–758.
- Stiegel G.J., Ramezan M. Hydrogen from coal gasification: an economical pathway to a sustainable energy future. *International Journal of Coal Geology*, 2011, no. 65, pp. 173–190.
- Godula-Jopek A., Westenberger A. Hydrogen-fueled aeroplanes. *Compendium of Hydrogen Energy*, 2016, no. 4, pp. 67–85.
- Hill P., Penev M. *Hydrogen Fueling Station in Honolulu, Hawaii Feasibility Analysis*. Idaho National Laboratory Idaho Falls, Idaho 83415. 2014. Available at: http://energy.gov/sites/prod/files/2014/08/f18/fcto_h2_fueling_station_honolulu_feasibility_analysis.pdf (accessed 10 September 2015).
- Decourt B., Debarre R., Soupa O. Making the Case for Hydrogen-Based Energy Storage. *Energy Perspectives*, 2013, vol. 3, pp. 18–25.
- Camiola V., Farchioni R., Cavallucci T., Rossi A., Pellegrini V., Tozzini V. Hydrogen storage in rippled graphene: perspectives from multi-scale simulations. *Front. Mater.*, 2015. DOI: 10.3389/fmats.2015.00003.
- OrMalley K., Ordaz G., Adams J., Randolph K., Ahn Ch.C., Stetson N.T. Applied hydrogen storage research and development: a perspective from the U.S. Department of Energy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, no. 645, pp. S419–S422.
- Marino C., Nucara A., Pietrafesa M. Electrolytic Hydrogen Production from Renewable Source, Storage and Reconversion in Fuel Cells: the System of the «Mediterranea» University of Reggio Calabria. *Energy Procedia*, 2015, no. 78, pp. 818–823.
- Yang S., Knickle H. Design and Analysis of Aluminum/Air battery system for electrical vehicles. *Journal of power sources*, 2002, vol. 112, pp. 162–173.

14. Vlaskin M.S., Shkolnikov E.I., Bersh A.V., Zhuk A.Z., Lisitsyn A.V., Sorokovikov A.I., Pankina Yu.V. Experimental cogeneration power plant based on hydrothermal oxidation of aluminum. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2011, no. 6, pp. 31–45. In Rus.
15. Larichev M.N., Laricheva O.O., Shaytura N.S., Shkolnikova E.I. On opportunity of practical use of particulate aluminum liquid water oxidation. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2012, no. 3, pp. 66–79. In Rus.
16. Qingfeng Li, Niels J. Bjerrum. Aluminum as anode for energy storage and conversion: a review. *Journal of Power Sources*, 2002, vol. 110, pp. 1–10.
17. *Hydrogen Generation by Treatment of Aluminium Metal with Aqueous Solutions: Procedures and Uses* / J. Olivares-Ramirez, A. Marroquín de Jesús, O. Jiménez-Sandoval, R. Pless // Hydrogen Energy – Challenges and Perspectives / Ed. by prof. Dragica Minic. InTech, 2012. – P. 56–76. Available at: <http://www.intechopen.com/books/hydrogen-energy-challenges-and-perspectives/hydrogen-generation-by-treatment-of-aluminium-metal-with-aqueous-solutions-procedures-and-uses> (accessed 01 June 2016).
18. Kundu A., Jang, J.H., Gil J.H., Jung C.R., Lee H.R., Kim S.H., Oh Y.S. Micro-fuel cells-current development and applications. *Journal of Power Sources*, 2007, no. 170 (1), pp. 67–78.
19. Kler A.M., Dekanova N.P., Skripkin S.K. *Matematicheskoye modelirovaniye i optimizatsiya v zadachakh operativnogo upravleniya teplovymi elektrostantsiyami* [Mathematical simulation and optimization in problems of real-time control of thermal power plants]. Novosibirsk, Nauka, Sib. predpriyatiye RAN, 1997. 120 p.
20. Kler A.M., Maximov A.S., Stepanova E.L. Mathematical modeling and optimization of large thermal power installations. *Proc. of the ASME-ATI-UIT 2010 Conference Thermal and Environmental Issues in Energy Systems*. Sorrento, Italy, Hilton Sorrento Palace, 2010. pp. 391–394.
21. Kler A.M., Potanina Yu.M. Tekhniko-ekonomicheskiye optimizatsionnyye issledovaniya perspektivnykh teploenergeticheskikh ustanovok [Technical and economic studies on optimization of perspective fossil thermal power plants]. *Perspektivy energetiki*, 2002, no. 4, pp. 385–398.

Received: 6 June 2016.

Information about the authors

Aleksandr M. Kler, Dr. Sc., professor, head of the department, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Elina A. Tyurina, Dr. Sc., leading researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Yulia M. Potanina, Cand. Sc., senior researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Aleksandr S. Mednikov, Cand. Sc., senior researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 662.815.4

ОЦЕНКА ТЕПЛОВЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТ В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТВЁРДОГО КОМПОЗИТНОГО ТОПЛИВА ИЗ НИЗКОСОРТНОГО СЫРЬЯ

Табакаев Роман Борисович¹,

TabakaevRB@tpu.ru

Казаков Александр Владимирович¹,

kazakov@tpu.ru

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

Актуальность работы обусловлена тенденцией ориентации энергетики на возобновляемые источники энергии в связи с необходимостью рационального использования традиционных органических ресурсов. В статье рассмотрен один из наиболее востребованных в России возобновляемых энергетических ресурсов – низкосортное топливо (торф, древесина и сапрпель), а также бурый уголь. В качестве способа облагораживания этого ресурса выбрана теплотехнологическая переработка в твердое композитное топливо.

Цель работы: оценка тепловых энергозатрат производства твердого композитного топлива из низкосортного сырья на примере разработанной авторами теплотехнологии.

Методы исследования. Теплотехнические характеристики низкосортного топлива определены по стандартным методикам ГОСТ Р 52911–2013, ГОСТ 55661–2013, ГОСТ 55660–2013, теплота сгорания установлена при помощи бомбового калориметра АБК-1 согласно ГОСТ 147–2013. При оценке тепловых затрат использованы методы материальных и тепловых балансов. Достоверность полученных результатов оценена их сопоставлением с данными других исследований.

Результаты. Использование теплоты разложения органической массы топлива и тепла от сжигания побочных продуктов термической переработки позволяет полностью покрыть тепловые нужды производства твердого композитного топлива из торфа, бурого угля и древесных опилок. При переработке сапрпели требуется покрытие части тепловых затрат за счет внешних источников. Низкотемпературный пиролиз исследуемого низкосортного сырья может протекать в автотермическом режиме за счет тепла разложения органической массы при условии, что влажность сырья на входе в реактор не будет превышать следующих значений: для торфа – 35 %, для исследованного бурого угля – 54 %, для опилок – 37 %. Для этого необходимо организовать предварительную сушку исходного сырья. Низкое значение теплоты разложения органической массы озерного сапрпели не позволяет организовать автотермическое протекание его термической переработки.

Ключевые слова:

Низкосортное сырьё, твердое композитное топливо, тепловая технология, автотермическое протекание пиролиза, оценка тепловых затрат переработки

Введение

Постепенное исчерпание качественных энергетических ресурсов, таких как природный газ и каменный уголь, а также приоритет ориентации их использования в сторону химической промышленности и металлургии приводят к необходимости нового взгляда на будущее энергетики. К настоящему времени более чем в 73 странах мира приняты государственные программы, направленные на повышение доли возобновляемых ресурсов в топливно-энергетическом балансе [1–3].

В качестве модели эволюционирования энергетической отрасли Российской Федерации разработана программа «Стратегия развития энергетики России на период до 2035 года», утвержденная Правительством, согласно которой предусматривается постепенное снижение в энергетике доли природного газа и восполнение снижаемой при этом мощности за счет возобновляемых ресурсов низкосортного органического сырья (НС), такого как торф, биомасса, низкокачественные бурые угли, сапрпель и т. п. Вместе с тем отмечается, что особенно целесообразно использование в зонах децентрализованного энергоснабжения, энергетика которых базируется на автономных энерге-

тических установках, работающих на привозном топливе.

НС в естественном состоянии крайне редко используется в качестве энергетического топлива из-за высоких эксплуатационных затрат, возникающих при его сжигании традиционными методами [4, 5]. Причиной этих затрат являются высокие значения влажности и зольности НС, обуславливающие низкую величину теплоты сгорания в пересчете на рабочее состояние и, соответственно, высокий расход, а также необходимость предварительной сушки. Более того, высокая влажность приводит к проблемам слипаемости и смерзаемости сырья при перевозках в зимний период [6], требуя дополнительных издержек на обогрев транспортных вагонов. Низкая прочность и высокая крошимость НС являются причиной высокой величины провала при слоевом сжигании.

Уже несколько десятилетий ведутся исследования, направленные на поиск путей эффективного вовлечения НС в энергетическое использование, в результате чего появились направления переработки [7–12] в топливные брикеты, газификации, каталитическому сжиганию, получению биотоплива и др. Одним из перспективных и распростра-

ненных направлений является теплотехнологическая переработка НС в энергетические продукты для последующего изготовления на их основе твердого композитного топлива (ТКТ) – топливных брикетов и пеллет. Однако одним из главных аргументов противников данного направления является мнение [13], что теплотехнологическая переработка характеризуется крупномасштабным и расточительным потреблением топливно-энергетических ресурсов, сырья и мощным выбросом экологически вредных отходов.

Целью данной работы ставится оценка тепловых энергозатрат производства ТКТ из низкосортного сырья на примере разработанной авторами теплотехнологии.

Основные аспекты теплотехнологии

Теплотехнология [14, 15] включает предварительную термическую переработку НС в энергетически ценные продукты (углеродистый остаток и пиролизный конденсат) и последующее формование на их основе ТКТ (рис. 1). В качестве способа

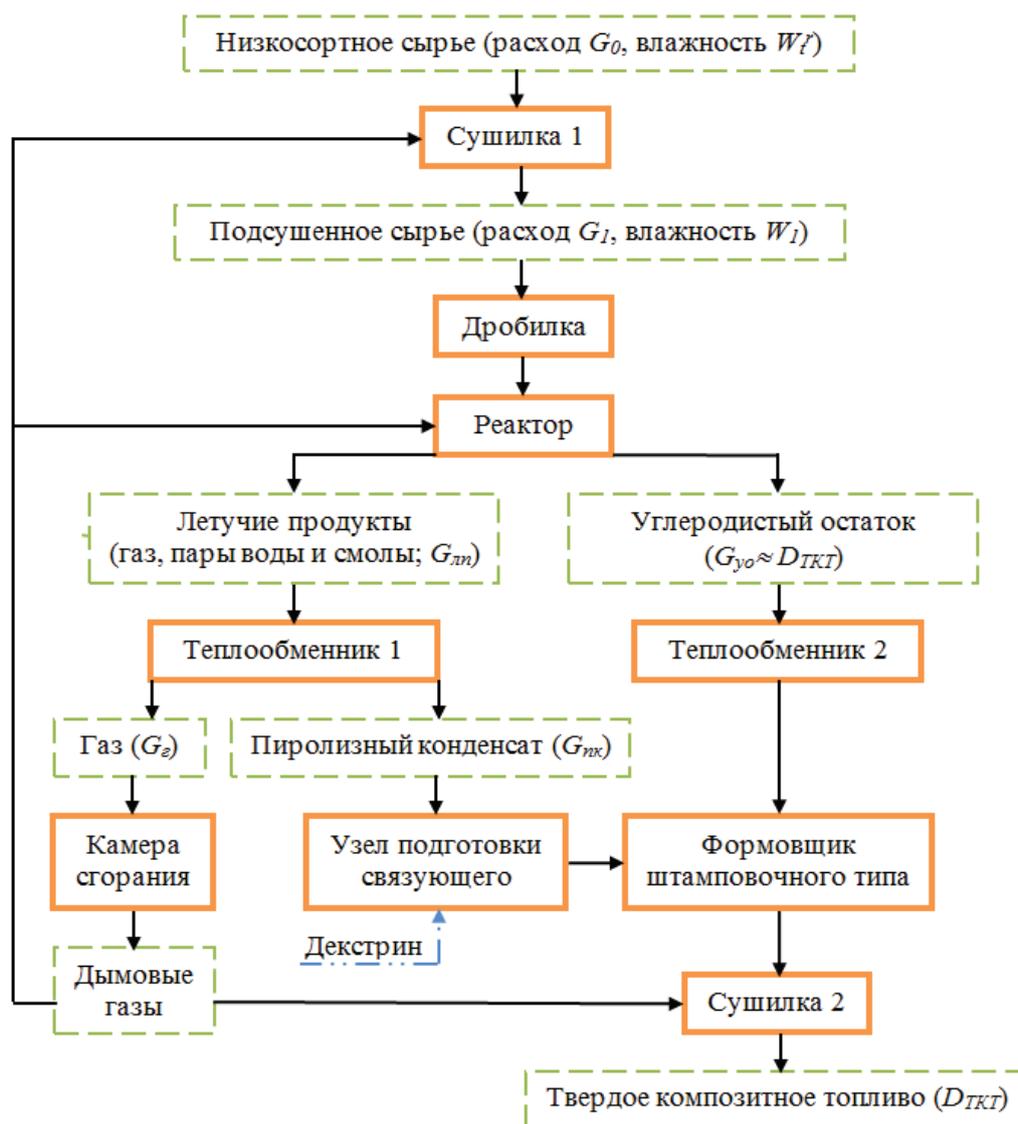


Рис. 1. Схема производства твердого композитного топлива: G_0 – расход НС, кг/с; W_l^i – влажность НС, %; G_1 – расход НС после подсушивания в сушилке 1, кг/с; W_1 – влажность НС после подсушивания, %; $G_{лп}$ – расход летучих продуктов, выделяемых в процессе пиролиза, кг/с; G_{yo} – расход углеродистого остатка, получаемого при пиролизе, кг/с; $D_{ТКТ}$ – производительность ТКТ, кг/с; G_r – расход газа, кг/с; $G_{пк}$ – расход пиролизного конденсата, кг/с

Fig. 1. Scheme of solid composite fuel production: G_0 is the low-grade raw material consumption, kg/s; W_l^i is the low-grade raw material moisture, %; G_1 is the low-grade raw material consumption at the outlet of the dryer 1, kg/s; W_1 is the low-grade raw material moisture at the outlet of the dryer 1, %; $G_{лп}$ is the consumption of volatile products released during pyrolysis, kg/s; G_{yo} is the consumption of carbon residue produced during the pyrolysis, kg/s; $D_{ТКТ}$ is the capacity of solid composite fuel, kg/s; G_r is the gas consumption, kg/s; $G_{пк}$ is the pyrolysis condensate consumption, kg/s

термической переработки НС выбран процесс пиролиза, температура которого не превышает 450 °С. Данная температура ведения процесса позволяет использовать доступные углеродистые стали обычного качества при изготовлении технологического оборудования, тем самым минимизируя затраты на материалы и проведение монтажа.

Побочный продукт термической переработки – газ – сжигается для покрытия тепловых издержек теплотехнологии.

Формование ТКТ осуществляют на основе связующего вещества, полученного растворением декстрина в пиролизном конденсате в соотношении 1:10 [16], и углеродистого остатка, измельченного до кусков менее 2 мм. Для этого углеродистый остаток смешивают со связующим в соотношении 2:3, формируют ТКТ и сушат полученный сырец: при изготовлении брикетов при температуре от 20 до 40 °С, пеллет – от 20 до 80 °С [17].

Результаты исследований и оценка тепловых затрат

Возможность получения ТКТ была исследована на нескольких видах НС Томской области: торф Кандинского месторождения, бурый уголь Таловского месторождения, опилки различных древесных пород, озерный сапрпель Карасевского месторождения.

В результате пиролиза перечисленного НС (температура процесса 450 °С, скорость нагрева сырья 10 °С/минуту) составлен материальный баланс (рис. 2) и определена теплота разложения органической массы (рис. 3).

По составляющим материального баланса пиролиза НС условно можно разделить на две груп-

пы: с преобладающим выходом углеродистого остатка – более 50 % (уголь и сапрпель) и с сопоставимым выходом углеродистого остатка и газа (торф и опилки). Первую группу целесообразно рассматривать для переработки в ТКТ, вторую группу – в качестве сырья как для изготовления ТКТ, так и для получения газа.

Низкотемпературный пиролиз высушенного НС сопровождается положительным тепловыделением 0,33–3,69 МДж/кг, что является характерной чертой для топлив, находящихся на ранних стадиях метаморфизма. При сжигании газа, побочного продукта теплотехнологии, с учетом КПД газовых топливосжигающих устройств малой мощности 92–95 % [18–20], возможно получение от 2,48 до 6,64 МДж тепловой энергии с каждого килограмма сухого перерабатываемого сырья. Таким образом, в процессе термической переработки 26–38 % от потенциально возможного тепловыделения НС может быть направлено на покрытие собственных тепловых нужд производства ТКТ.

Характеристики НС и получаемого из него ТКТ, согласно рассмотренной теплотехнологии, приведены в табл. 1. Ввиду специфики переработки получаемое ТКТ имеет более высокую зольность и меньший выход летучих веществ по сравнению с исходным НС, однако его значение ниже теплоты сгорания в 2,1–6,8 раз выше. При этом топливо обладает механической прочностью, согласно ГОСТ Р 54248–2010 достаточной для использования в системах жилищно-коммунального хозяйства: 100%-я устойчивость к разрушению при падении и сопротивление сжатию более 0,3 МПа (метод испытаний ГОСТ 21289–75).

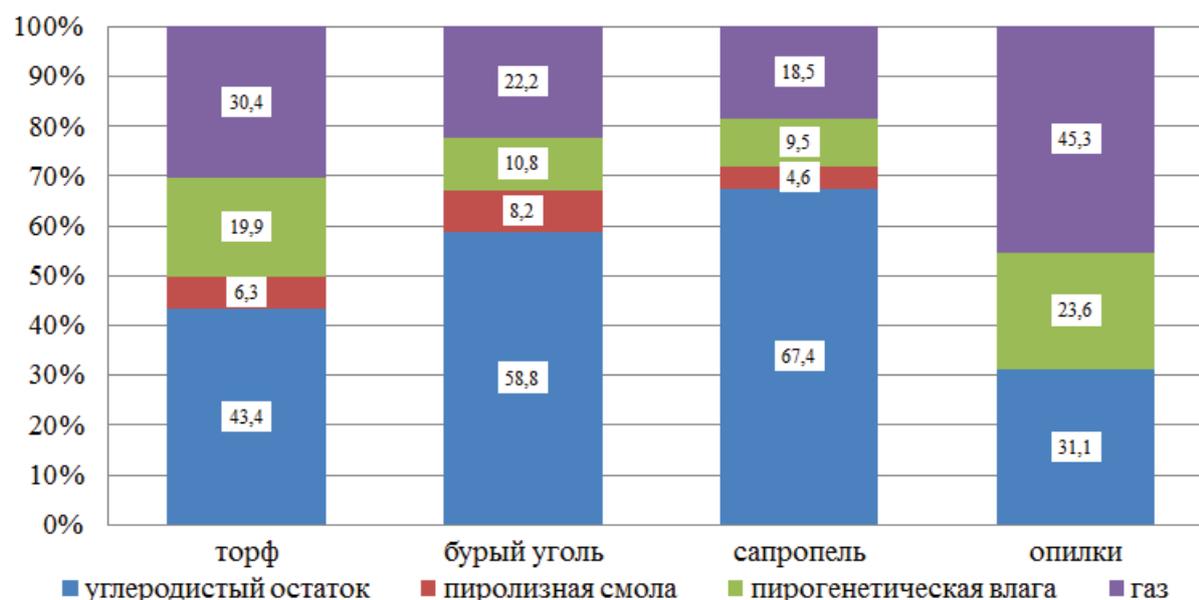


Рис. 2. Материальный баланс низкотемпературного пиролиза (относительно сухой массы исходного сырья)

Fig. 2. Material balance of low-temperature pyrolysis (relative to dry weight of raw material)

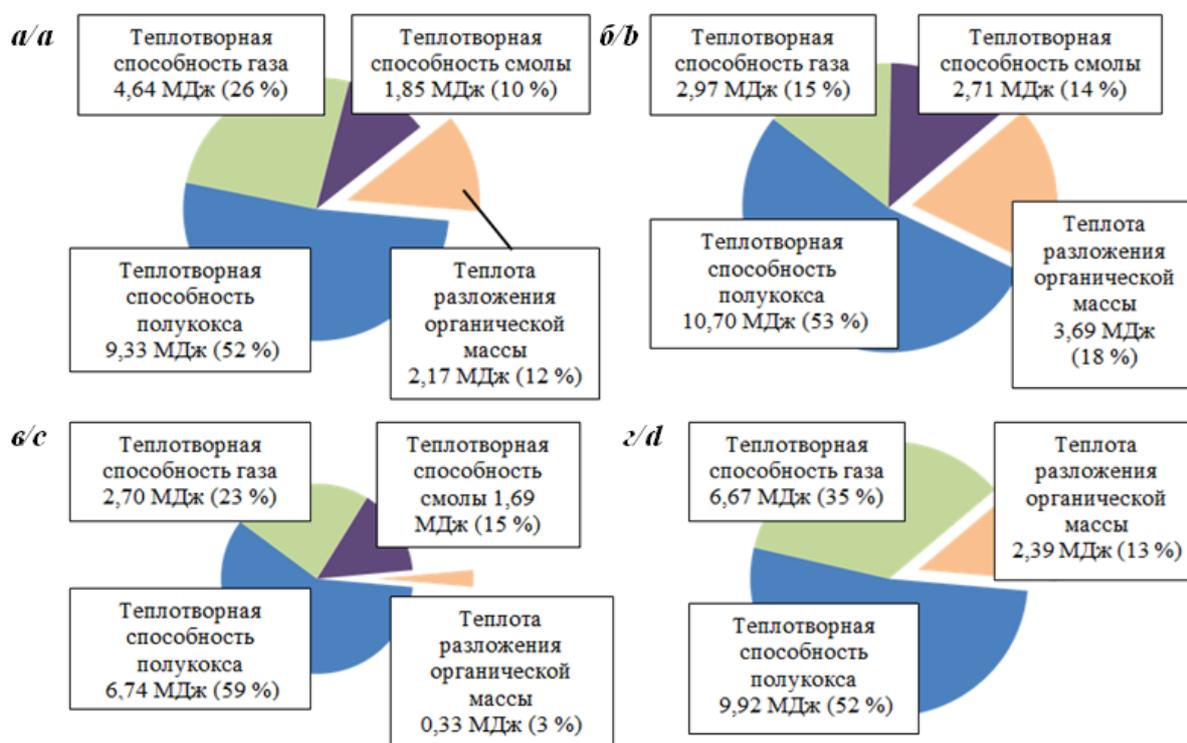


Рис. 3. Распределение потенциального тепловыделения между продуктами пиролиза высушенного низкосортного сырья: а) торф; б) бурый уголь; в) сапропель; г) опилки [15]

Fig. 3. Potential heat release distribution among products of pyrolysis of dried low-grade raw materials: a) peat, b) brown coal, c) sapropel, d) sawdust [15]

Таблица 1. Теплотехнические характеристики исходного сырья и ТКТ на его основе

Table 1. Thermotechnical characteristics of source raw material and solid composite fuel

Теплотехническая характеристика Thermotechnical characteristic	Торф Peat	Бурый уголь Brown coal	Сапропель Sapropel	Опилки Wood chips
Исходное сырье/твердое композитное топливо Initial raw material/solid composite fuel				
Рабочая влажность W_f , % Moisture W_f , %	72,8/0	51,0/0	67,0/0	45/0
Зольность на сухую массу A^d , % Ash on dry basis A^d , %	9,1/19,1	25,9/32,1	38,4/47,1	0,6/2,9
Выход летучих веществ V^{vol} , % Yield of volatile substances V^{vol} , %	71,6/19,4	63,2/10,6	84,8/16,5	91,8/13,1
Нижшая теплота сгорания Q_f , МДж/кг Net calorific value Q_f , MJ/kg	3,1/21,1	8,6/18,0	2,1/11,6	9,3/29,4

Оценка тепловых затрат производства ТКТ

При производстве ТКТ тепловая энергия необходима для осуществления сушки исходного сырья, его термической переработки и сушки сыр-

ца. Приблизительно оценить необходимые тепловые затраты возможно следующим образом.

Тепло на сушку НС:

$$Q_{c1} = (G_0 - G_1)r, \text{ кВт}, \quad (1)$$

где r – теплота парообразования, кДж/кг.

Тепло на сушку сырца ТКТ (при соотношении углеродистого остатка и связующего вещества 2:3):

$$Q_{c2} = \frac{3}{2} G_{yo} r, \text{ кВт}. \quad (2)$$

Тепло на термическую переработку НС можно разбить на несколько составляющих: испарение остаточной влаги ($Q_{ТП1}$), нагрев сырья до температуры начала термического разложения ($Q_{ТП2}$), осуществление пиролиза ($Q_{ТП3}$), потерю с физическим теплом летучих продуктов ($Q_{ТП4}$). При расчете необходимо учитывать выделение теплоты разложения органической массы НС ($Q_{разл}$) и тепловые потери в окружающую среду (Q_5). Соответственно, формула для определения тепла, необходимого для осуществления термической переработки, примет вид:

$$Q_{ТП} = Q_{ТП1} + Q_{ТП2} + Q_{ТП3} + Q_{ТП4} + Q_5 - Q_{разл}, \text{ кВт}, \quad (3)$$

где

$$Q_{ТП1} = G_1 W_1 r, \text{ кВт};$$

$$Q_{ТП2} = C_p^{HC} G_1 (1 - W_1) (t_{HTP} - 20), \text{ кВт};$$

$$C_p^{HC} - \text{теплоемкость НС, кДж/(кг} \cdot \text{}^\circ\text{C)};$$

Таблица 2. Оценка тепловых издержек и тепловыделения производства ТКТ (45 т/сутки)

Table 2. Assessment of heat costs and heat release of solid composite fuel production (45 tons per day)

Низкосортное сырье Low-grade raw material	W_1	Q_{c1}	Q_{c2}	$Q_{тп}$					$Q_{разл}$	Q_r	Сумма тепловых затрат и тепловыделения Sum of heat costs and heat release
				$Q_{тп1}$	$Q_{тп2}$	$Q_{тп3}$	$Q_{тп4}$	Q_5			
	%	кВт									
Торф/Peat	35	-301	-1760	-1444	-149	-207	-1080	-29	2604	5140	2774
Уголь/Brown coal	54	0		-2310	-322	-229	-385	-32	3247	2439	648
Сапропель/Sapropel	-	-1421		0	-257	-192	-332	-8	254	1910	-1806
Опилки/Wood chips	37	-341		-2188	-496	-396	-913	-40	3991	10467	9914

$t_{нтр}$ – температура начала термического разложения НС, °С;

$$Q_{тп3} = C_p^{yo} \left(\frac{G_1(1-W_1) + G_{yo}}{2} \right) (450 - t_{нтр}), \text{ кВт};$$

$$Q_{тп4} = C_p^{лп} [G_1(1-W_1) - G_{yo}] (450 - t_{нтр}), \text{ кВт};$$

Q_5 – потери в окружающую среду, кВт;

$$Q_{разл} = G_1(1-W_1)Q_{разл}^{НС}, \text{ кВт};$$

$Q_{разл}^{НС}$ – теплота разложения органической массы НС (определяется по рис. 3).

Если предположить, что тепла от разложения органической массы НС ($Q_{разл}$) будет достаточно для покрытия тепловых нужд ($Q_{тп1}$, $Q_{тп2}$, $Q_{тп3}$, $Q_{тп4}$ и Q_5), то (3) примет следующий вид:

$$Q_{разл} = Q_{тп1} + Q_{тп2} + Q_{тп3} + Q_{тп4} + Q_5, \text{ кВт}. \quad (4)$$

В этом случае решение задачи сводится к определению значения влажности НС после сушилки 1 (W_1). При поступлении НС в реактор со значением влажности W_1 меньшим, чем определенное расчетным путем, процесс пиролиза будет протекать автотермически.

Источником тепловой энергии, помимо теплоты разложения органической массы, для рассматриваемой теплотехнологии является тепло (Q_r), полученное при сжигании газа. Результаты теплового расчета малотоннажного производства ТКТ (45 т/сутки) показаны в табл. 2. При этом принято, что благодаря длительному хранению на воздухе после добычи исходное НС поступает в сушилку 1 со значением влажности 45 % [21].

Проведенный расчет показал, что при переработке торфа, бурого угля и опилок в ТКТ тепла, выделяющегося при разложении органической массы и сжигании газа, будет достаточно для покрытия тепловых нужд теплотехнологии. При этом протекание низкотемпературного пиролиза в автотермическом режиме возможно после сушки НС в сушилке 1 до следующих значений влажности

(W_1): торфа – 35 %, опилок – 37 %, бурого угля – 54 % (необходимость в сушилке 1 отсутствует).

Для получения ТКТ из сапропеля необходимо покрытие около 1700 кВт тепловых затрат за счет внешних ресурсов.

Полученные результаты по порядку величины влажности торфа (W_1), при которой процесс пиролиза протекает автотермически, сопоставимы с [22]. Выводы о возможности автотермического протекания процесса переработки и достаточности тепловыделения продуктов для покрытия собственных тепловых затрат подтверждаются результатами в работах [23, 24].

Выводы

1. Использование теплоты от разложения органической массы топлива и теплоты от сжигания побочных продуктов термической переработки позволяет полностью покрыть тепловые нужды производства твердого композитного топлива из торфа, бурого угля и древесных опилок. Производство топлива из сапропеля требует покрытия части тепловых затрат за счет внешних источников.
2. Низкотемпературный пиролиз исследуемого низкосортного сырья может протекать в автотермическом режиме за счет тепла от разложения органической массы при условии, что влажность сырья на входе в реактор не будет превышать следующих значений: для торфа – 35 %, для исследованного бурого угля – 54 %, для опилок – 37 %. Для этого необходимо организовать предварительную сушку исходного сырья. Низкое значение теплоты разложения органической массы озерного сапропеля не позволяет организовать автотермическое протекание его термической переработки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-50124 (мол_нр).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Popel' O.S., Reutov B.F., Antropov A.P. Prospective lines of using renewable energy sources in centralized and independent power systems // *Thermal engineering*. – 2010. – V. 57. – P. 909–918.
2. Fortov V.E., Popel' O.S. The current status of the development of renewable energy sources worldwide and in Russia // *Thermal engineering*. – 2014. – V. 61. – P. 389–398.
3. Competitiveness assessment of the biomass power generation industry in China: A five forces model study / Z.-Y. Zhao, J. Zuo, P.-H. Wu, H. Yan, G. Zillante // *Renewable Energy*. – 2016. – V. 89. – P. 144–153.
4. Беляев А.А. Сжигание высокозольного топлива и возможности его использования на ТЭС // *Химия твердого топлива*. – 2005. – № 1. – С. 44–53.
5. Боднар Л.А., Ткаченко С.И., Дахновская О.В. Проблемы сжигания низкосортного топлива в котлах малой мощности // *Научные труды Винницкого национального технического университета*. – 2012. – № 4. – С. 1–7.
6. Transportation of coal concentrates at negative ambient temperatures / A.D. Uchitel', M.V. Kormer, V.P. Lyalyuk, I.A. Lyakhova, E.O. Shmel'tser, Y.I. Vititnev // *Coke and Chemistry*. – 2013. – V. 56. – P. 167–172.
7. Promdee K., Vitidsant T. Synthesis of char, bio-oil and gases using a screw feeder pyrolysis reactor // *Coke and chemistry*. – 2013. – V. 56. – P. 466–469.
8. Каталитическое сжигание битуминозного песка и сланцев с различным содержанием керогена / А.Д. Симонов, Н.А. Языков, Ю.В. Дубинин, А.С. Афлятунов, В.А. Яковлев, В.Н. Пармон // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология»*. – 2013. – № 4–2. – С. 52–60.
9. Rokni M. Biomass gasification integrated with a solid oxide fuel cell and Stirling engine // *Energy*. – 2014. – V. 77. – P. 6–18.
10. Barbara J.W., Tesfayohanes W.Y., Lupita D.M. Evaluation of Solid Fuel Char Briquettes from Human Waste // *Environmental Science and Technology*. – 2014. – V. 48. – P. 9852–9858.
11. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Simultaneous ignition of several droplets of coal-water slurry containing petrochemicals in oxidizer flow // *Fuel Processing Technology*. – 2016. – V. 152. – P. 22–33.
12. Sánchez F., San Miguel G. Improved fuel properties of whole table olive stones via pyrolytic processing // *Biomass and Bioenergy*. – 2016. – V. 92. – P. 1–11.
13. Клименко А.В., Зорин В.М. Теплоэнергетика и теплотехника: общие вопросы. – М.: МЭИ, 1999. – 528 с.
14. Теплотехнология переработки низкосортного топлива в высококалорийные топливные брикеты / Р.Б. Табакаев, А.В. Казаков, А.С. Загорин, И.Г. Черемисин // *Энергосбережение и водоподготовка*. – 2014. – № 6. – С. 29–33.
15. Табакаев Р.Б., Казаков А.В., Загорин А.С. Термическое обогащение низкосортного твердого топлива // *Химия твердого топлива*. – 2015. – № 5. – С. 3–9.
16. Казаков А.В., Табакаев Р.Б., Плахова Т.М. Влияние связующих веществ на прочностные свойства топливных брикетов из торфа // *Теплофизические основы энергетических технологий: сб. научных трудов II Всероссийской научно-практ. конф.* – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – С. 222–225.
17. Табакаев Р.Б., Казаков А.В., Загорин А.С. Твёрдое композитное топливо из низкосортного сырья (технологический аспект) // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014. – № 4. – С. 56–64.
18. Васильев А.В., Антропов Г.В., Сизоненко А.А. Сравнительный анализ паровых и водогрейных котлов для промышленных и отопительных котельных // *Промышленная энергетика*. – 2003. – № 9. – С. 18–23.
19. Верес А.А., Носова Т.В., Малов А.В. Перспективы применения блочных котельных с использованием в качестве источника теплоснабжения водогрейных жаротрубных котлов «Турботерм-Гарант» // *Энергосбережение и водоподготовка*. – 2010. – № 4. – С. 27–28.
20. Experimental analysis of fouling rates in two small-scale domestic boilers / Patiño D., Crespo B., Porteiro J. Míguez J.L. // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – V. 100. – P. 849–860.
21. Колотушкин В.И. Справочная книжка торфяника. – М.: Недра, 1973. – 208 с.
22. Кулеш Р.Н., Субботин А.Н. Экспериментальное исследование параметров зажигания торфа в условиях его промышленного складирования // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 15–20.
23. Wang L.-Q., Chen Z.-S. Gas generation by co-gasification of biomass and coal in an autothermal fluidized bed gasifier // *Applied Thermal Engineering*. – 2013. – V. 59. – P. 278–282.
24. Складнев Е.В., Балабанова М.Ю., Игнатьева Н.Н. Комплексная переработка целлюлозосодержащих отходов птицефабрик и сахарного производства // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. – 2015. – № 3. – С. 136–140.

Поступила 27.06.2016 г.

Информация об авторах

Табакаев Р.Б., кандидат технических наук, инженер кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Казаков А.В., кандидат технических наук, доцент кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 662.815.4

ASSESSMENT OF THERMAL ENERGY USE IN TECHNIQUE OF PRODUCING SOLID COMPOSITE FUELS FROM LOW-GRADE RAW MATERIALS

Roman B. Tabakaev¹,
TabakaevRB@tpu.ru

Alexander V. Kazakov¹,
kazakov@tpu.ru

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

The relevance of the work is conditioned by the tendency of power engineering focus on renewable energy sources owing to the need to use efficiently the traditional organic resources. The paper considers low-grade fuel (peat, sawdust and sapropel) and brown coal as one of the most requested renewable energy resources in Russia. The heat-technology processing into solid composite fuel is selected as the method to enrich this resource.

The main aim of the research is to assess energy use for producing solid composite fuel from low-grade raw material by the example of heat-technology developed by the authors.

The methods used in the research. Thermotechnical characteristics of low-grade fuels were determined by the standard methods GOST R 52911–2013, 55661–2013 and 55660–2013. Calorific value was studied using a bomb calorimeter ABK-1 according to GOST 147–2013. The methods of material and heat balances were used in assessing thermal costs. The reliability of the results was confirmed by comparing them with the results of other investigations.

Results. Using heat of fuel organic mass decomposition and heat of combustion of thermal-processing by-products allowed covering completely heating needs for producing solid composite fuel from peat, brown coal and sawdust. When treating sapropel a part of heat input should be covered by external sources. Low-temperature pyrolysis of low-grade raw material may take place autothermally owing to heat of organic mass decomposition. In this case it is necessary that the moisture of raw materials at the reactor input was lower than the following values: for peat – 35 %, for the investigated brown coal – 54 %, for sawdust – 37 %. Low value of heat of lake sapropel organic decomposition does not allow organizing autothermal heat-processing

Key words:

Low-grade raw materials, solid composite fuel, heat-technology, autothermal pyrolysis, assessment of thermal processing costs.

The research was financially supported by the RFBR in scientific project no. 16–38–50124 (мол_нр).

REFERENCES

1. Popel' O.S., Reutov B.F., Antropov A.P. Prospective lines of using renewable energy sources in centralized and independent power systems. *Thermal engineering*, 2010, vol. 57, no. 11, pp. 909–918.
2. Fortov V.E., Popel' O.S. The current status of the development of renewable energy sources worldwide and in Russia. *Thermal engineering*, 2014, vol. 61, no. 6, pp. 389–398.
3. Zhao Z.-Y., Zuo J., Wu P.-H., Yan, H., Zillante G. Competitive-ness assessment of the biomass power generation industry in China: a five forces model study. *Renewable Energy*, 2016, vol. 89, pp. 144–153.
4. Belyaev A.A. Combustion of high-ash fuel and the possibility of its utilization in heat-and-power plants. *Solid Fuel Chemistry*, 2005, vol. 39, no. 1, pp. 39–47. In Rus.
5. Bodnar L., Tkachenko S., Dakhnovska O. Problems of low-grade fuel burning in low capacity boilers. *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*, 2012, no. 4, pp. 1–7. In Rus.
6. Uchitel' A.D., Kormer M.V., Lyalyuk V.P., Lyakhova I.A., Shmel'tser E.O., Vititnev Y.I. Transportation of coal concentrates at negative ambient temperatures. *Coke and Chemistry*, 2013, vol. 56, no. 5, pp. 167–172.
7. Promdee K., Vitidsant T. Synthesis of char, bio-oil and gases using a screw feeder pyrolysis reactor. *Coke and chemistry*, 2013, vol. 56, no. 12, pp. 466–469.
8. Simonov A.D., Yazykov N.A., Dubinin Y.V., Aflyatunov A.S., Yakovlev V.A., Parmon V.N. Catalytic combustion of tar sand and slates with different kerogen content. *International scientific journal for alternative energy and ecology*, 2013, vol. 124, no. 4–2, pp. 52–60. In Rus.
9. Rokni M. Biomass gasification integrated with a solid oxide fuel cell and Stirling engine. *Energy*, 2014, vol. 77, pp. 6–18.
10. Barbara J.W., Tesfayohanes W.Y., Lupita D.M. Evaluation of Solid Fuel Char Briquettes from Human Waste. *Environmental Science and Technology*, 2014, vol. 48, no. 16, pp. 9852–9858.
11. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Simultaneous ignition of several droplets of coal-water slurry containing petrochemicals in oxidizer flow. *Fuel Processing Technology*, 2016, vol. 152, pp. 22–33.
12. Sánchez F., San Miguel G. Improved fuel properties of whole table olive stones via pyrolytic processing. *Biomass and Bioenergy*, 2016, vol. 92, pp. 1–11.
13. Klimenko A.V., Zorin V.M. *Teplotekhnika i teplotekhnika: obshchie voprosy* [Thermal Engineering and Heat Engineering: general issues]. Moscow, Publishing of Moscow Power Engineering Institute, 1999. 528 p.
14. Tabakaev R.B., Zavorin A.S., Kazakov A.V., Cheremisin I.G. Thermotechnologi processing of low-grade fuel in high-calorie fuel briquettes. *Energy Saving and Water Treatment*, 2014, vol. 92, no. 6, pp. 29–33. In Rus.
15. Tabakaev R.B., Kazakov A.V., Zavorin A.S. Thermal pretreatment of low-grade solid fuel. *Solid Fuel Chemistry*, 2015, vol. 49, no. 5, pp. 267–273. In Rus.
16. Kazakov A.V., Tabakaev R.B., Plakhova T.M. Vliyanie svyazuyushchikh veshchestv na prochnostnye svoystva toplivnykh briкетов iz torfa [Effect of binder on strength properties of peat fuel

- briquettes]. *Trudy II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Teplofizicheskie osnovy energeticheskikh tekhnologiy* [Proc. 2nd All-Russian scientific-practical conference. Thermal energy technology basics]. Tomsk, 2011. pp. 222–225.
17. Tabakaev R.B., Kazakov A.V., Zavorin A.S. Solid composite fuel from low-grade raw (technological aspect). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 56–64. In Rus.
 18. Vasiliev A.V., Antropov G.V., Sizonenko A.A. Sravnitelny analiz parovykh i vodogreynykh kotlov dlya promyshlennykh i otopitelnykh kotelnykh [Comparative analysis of steam and hot water boilers for industrial and heating boiler houses]. *Industrial power*, 2003, no. 9, pp. 18–23.
 19. Veres A.A., Nosova T.V., Malov A.V. Prospects of block boiler using as a source of heating hot water boilers fire-tube «Turboterm garantor». *Energy Saving and Water Treatment*, 2010, no. 4, pp. 27–28. In Rus.
 20. Patiño D., Crespo B., Porteiro J., Míguez J.L. Experimental analysis of fouling rates in two small-scale domestic boilers. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 100, pp. 849–860.
 21. Kolotushkin V.I. *Spravochnaya knizhka torfyanika* [Reference book of peat bog]. Moscow, Nedra Publ., 1973. 208 p.
 22. Kulesh R.N., Subbotin A.N. Experimental investigation of peat ignition parameters in terms of its industrial storage. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 4, pp. 15–20. In Rus.
 23. Wang L.-Q., Chen Z.-S. Gas generation by co-gasification of biomass and coal in an autothermal fluidized bed gasifier. *Applied Thermal Engineering*, 2013, vol. 59, pp. 278–282.
 24. Sklyadnev E.V., Balabanova M.Yu., Ignatyeva N.N. Complex processing of cellulose waste from poultry and sugar production. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2015, vol. 65, no. 3, pp. 136–140. In Rus.

Received: 27 June 2016.

Information about the authors

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

Alexander V. Kazakov, Cand. Sc., associate professor, 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 30.08.2016. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 13,73. Уч.-изд. л. 12,41.
Заказ 318-16. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ