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



ISSN 2413-1830

# ИЗВЕСТИЯ томского политехнического

# УНИВЕРСИТЕТА

Инжиниринг георесурсов

Том 326, № 10, 2015



г. Томск

# ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. Инжиниринг георесурсов

#### Редакционная коллегия

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

> > > © ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2015

#### УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – Свидетельство ПИ № 77-16615 от 24 октября 2003 г.

ISSN 2413-1830

Импакт-фактор РИНЦ 2013 - 0,217

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

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

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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

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



ISSN 2413-1830

# BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC

# UNIVERSITY

**Geo Assets Engineering** 

Volume 326, № 10, 2015



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 (Nitherlands) Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia) Alekseenko S.V., Dr. Sc. (Russia) Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia) Kochegurov A.I., Cand. Sc. (Russia) Rui D., PhD (Portugal) Ziatdinov R.A., Cand. Sc. (Turkey) Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia) Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia) Kiryanova L.G., managing editor, Cand. Sc. (Russia) Glazyrin A.S., managing editor, Cand. Sc. (Russia)

© Tomsk Polytechnic University, 2015

#### AIMS AND SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

The journal is registered internationally (ISSN 2413-1830) and nationally (Certificate PE  $\mathbb{N}^{\circ}$  77-166615, October 24, 2003 from the RF Ministry of Press, Broadcasting and Mass Communications).

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

CONTENTS

### СОДЕРЖАНИЕ

Позднечетвертичная вечная мерзлота как фактор геотермического режима и реализации нефтегенерационного потенциала баженовской свиты (Томская и Новосибирская области) Искоркина А.А., Исагалиева А.К., Исаева О.С., Косыгин В.Ю., Исаев В.И.	6	Late Quaternary permafrost as a factor of geothermal mode and realization of petrogenerative capacity of the Bazhenov suite (Tomsk and Novosibirsk regions) Iskorkina A.A., Issagalieva A.K., Isaeva O.S., Kosygin V.Yu., Isaev V.I.
Прогнозирование температурных полей ограждающих конструкций зданий и грунта для расчета тепловой изоляции инженерных коммуникаций в климатических условиях г. Якутска Анисимов М.В., Рекунов В.С.	24	Prediction of temperature fields of building envelopes and ground for calculating the heat insulation of engineering lines in the climatic conditions of Yakutsk Anisimov M.V., Rekunov V.S.
Упрощенный метод определения допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях энергосистем Поляков И.А.	35	Simplified method for computing allowed active power flow in controlled power system ections Polyakov I.A.
Устойчивость продуктов сгорания в воздухе смесей нанопорошка алюминия с диоксидами титана и циркония к действию фтороводородной кислоты в восстановительной среде	46	Stability of products of combusting in air aluminum nanopowder with titanium and zirconium dioxides to hydrofluoric acid action in reductive media
Шинкевич Е.В., Роот Л.О.		Shinkevich E.V., Root L.O.
Повышение энергетическои эффективности системы тягового электроснабжения в условиях работы постов секционирования с накопителями электрической энергии Черемисин В.Т., Незевак В.Л., Шатохин А.П.	54	Increase of energy efficiency of electric traction system in operating condition of sectioning posts with electric energy storage units Cheremisin V.T., Nazevak V.L., Shatokhin A.P.
Деструкция молекулярных соединений в газовой и жидкой средах в плазме СВЧ разряда Жерлицын А.Г., Шиян В.П., Шиян Л.Н., Магомадова С.О.	65	<b>Destruction of organic compounds in gaseous</b> <b>and liquid media in microwave discharge plasma</b> Zerlitsyn A.G., Shiyan V.P., Shiyan L.N., Magomadova S.O.
Электроимпульсная обработка водных растворов гуминовых веществ в слое железных гранул в процессах водоочистки Войно Д.А., Лобанова Г.Л., Юрмазова Т.А., Шиян Л.Н., Мачехина К.И.	72	Electropulse treating of humic substance aqueous solutions in a layer of iron granules at water purification Voyno D.A., Lobanova G.L., Yurmazova T.A., Shiyan L.N., Machekhina K.I.
Петрология и золотоносность адакитовых гранитоидов усть-беловского комплекса макарьевского ареала Горного Алтая Гусев А.И. Коробейников А.Ф.	81	Petrology and gold contentadakiticgranitoids of Ust-Belovskii complex in Makarevskii range of Gorny Altai Gusey A.L. Korobevnikov A.F.
Обоснование границ зон санитарной охраны водозаборов подземных вод на урбанизированных территориях на примере г. Южно-Сахалинска Сахаров В.А., Морозова О.А., Жукова Ю.А.	92	Justification of the boundaries of the sanitary protection zones of groundwater intakes in urban areas by the example of Yuzhno-Sakhalinsk Sakharov V.A., Morozova O.A., Zhukova Yu.A.
Теории, гипотезы гидротермального породо- рудообразования и реальность: факты и аргументы Кучеренко И.В.	99	Theories, hypotheses of hydrothermal rock-ore-formation and reality: facts and arguments Kucherenko I.V.
Исследование электромагнитной трансмиссии с переменным передаточным отношением в ветроэнергетической установке в целях повышения запаса динамической устойчивости Упалов С Н. Ачитаев А. А. Юманов М.С.	123	Research of magnetic transmission with variable gear ratio in a wind-driven generator for improving dynamic stability stoke Udalow S. N. Pristun A.G. Achitaev A.A.
Оптимизация работы многопластовых скважин с ЭЦН по результатам гидродинамического и промыслово- геофизического мониторинга Панарина Е.П., Кременецкий М.И., Кричевский В.М.,	135	Optimization of multi-pay wells functioning with ESP unit by the results of hydrodynamic and field-geophysical monitoring Panarina E.P., Kremenetskiy M.I., Krichevskiy V.M.,
ипатов А.И., БИККУЛОВ М.М., КОНОВАЛОВ А.О. Гранулометрический анализ как основной метод	143	Granulometric analysis as the main
обоснования условий формирования пластов-коллекторов ЮК <sub>2-5</sub> Ем-Еговской площади (Западная Сибирь) Кудояшова Л.К.		method to justify the formation conditions of reservoirs JK <sub>2-5</sub> in Em-Egovskoe field (Western Siberia) Kudrvashova L.K.
Кинетика уменьшения концентрации парагнитных центров при старении продуктов химической карбонизации поливинилиденфторида Живулин В.Е., Злобина Н.А., Песин П.А.	150	Kinetics of paramagnetic centers decrease at ageing of chemically carbonized derivatives of poly vinylidene fluoride Zhivulin V.E., Zlobina N.A., Pesin L.A.
Исследование процесса нейтрализации гидросульфата калия Шевелева О.Г., Рупчева В.А., Пойлов В.З.	157	Study of potassium hydrogensulfate neutralization Sheveleva O.G., Rupcheva V.A., Poilov V.Z.

УДК 553.98:553.041:552.578:550.8.05

## ПОЗДНЕЧЕТВЕРТИЧНАЯ ВЕЧНАЯ МЕРЗЛОТА КАК ФАКТОР ГЕОТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА И РЕАЛИЗАЦИИ НЕФТЕГЕНЕРАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ (ТОМСКАЯ И НОВОСИБИРСКАЯ ОБЛАСТИ)

### Искоркина Альбина Альбертовна,

аспирант кафедры геофизики Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: iskorkina.a@mail.ru

#### Исагалиева Айгуль Калиевна,

ст. преподаватель кафедры геофизики Института геологии и нефтегазового дела Казахского национального технического университета им. К.И. Сатпаева, Республика Казахстан, 050013, г. Алматы, ул. Сатпаева, д. 22. E-mail: a isagalieva@mail.ru

#### Исаева Ольга Степановна,

руководитель Томского филиала ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по Сибирскому федеральному округу», Россия, 634034, г. Томск, ул. Мокрушина, д. 9, стр. 16. E-mail: isaeva\_sah@mail.ru

#### Косыгин Владимир Юрьевич,

д-р геол.-минерал. наук, ведущ. науч. сотр. Вычислительного центра ДВО РАН, Россия, 680000, г. Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65. E-mail: kosyginv@inbox.ru

#### Исаев Валерий Иванович,

д-р геол.-минерал. наук, профессор кафедры геофизики Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: isaevvi@tpu.ru

**Актуальность исследований** обусловлена необходимостью разработки критериев и эффективных схем количественной оценки ресурсов – перспектив нефтегазоносности территорий Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, имеющей уникальные позднечетвертичные палеоклиматические особенности. В обзоре проблемы совершенствования методики подсчета ресурсов углеводородов объемно-генетическим методом определены основные палеоклиматические факторы: 1) вековой ход температур на земной поверхности; 2) формирование и деградация неоплейстоценовой толщи вечномерзлых пород; 3) позднечетвертичные ледниковые покровы.

**Цель исследований** – определить влияние 2-го фактора палеоклимата – неоплейстоценовой толщи мерзлоты – на расчетный геотермический режим и степень реализации генерационного потенциала нефтематеринских толщ на примере баженовской свиты юго-востока Западной Сибири.

**Объект исследований** – баженовские отложения мезозойско-кайнозойского разреза, вскрытого глубокими скважинами на юго-востоке Западной Сибири (Лугинецкое месторождение Томской области, Верх-Тарское месторождение Новосибирской области).

**Методика исследований** основана на методе палеотемпературного моделирования – решении обратной и прямых задач нестационарной геотермии в условиях седиментации, на многовариантности палеотектонических и палеотемпературных реконструкций, на оценке соответствия результатов реконструкций критериям оптимальности решения обратной задачи геофизики, на оценке степени согласованности расчетных очагов генерации нефтей с установленной нефтегазоносностью недр.

Результаты исследований. Установлено, что необходим учет неоплейстоценовой мерзлоты мощностью порядка 300 м и предпочтительно применять «местный» (региональный) вековой ход температур на земной поверхности для адекватного восстановления термической истории нефтематеринских отложений на землях юго-востока Западной Сибири. Это позволяет корректно учесть историю главной фазы нефтеобразования и не занижать (до 25–30 %) расчетные ресурсы углеводородов, получаемые объемно-генетическим методом. Сделан вывод, что междисциплинарный подход (нефтегазовая геология, геофизика и палеоклиматология) может обеспечить создание ресурсоэффективных технологий поисков и разведки УВ.

#### Ключевые слова:

Ресурсы углеводородов, неоплейстоценовая мерзлота, баженовские отложения, палеотемпературное моделирование, юговосток Западной Сибири.

#### Введение

Осадочно-миграционная теория нафтидогенеза [1, 2] – интенсивно развивающаяся отрасль современной науки. В рамках методологии и развития теории нафтидогенеза и проведены настоящие исследования. Исследования направлены на решение фундаментальной научной проблемы – разработку критериев и эффективных схем количественной оценки перспектив нефтегазоносности территорий Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, имеющих ряд уникальных особенностей. Одна из особенностей состоит в следующем. В северном полушарии Земли в плейстоцене произошло глобальное событие – резкое похолодание климата. Похолодание на земной поверхности, промерзание пород осадочного чехла, ледниковые покровы могли приводить к снижению температурного поля во всем осадочном разрезе, включая потенциально нефтематеринские отложения, по качественным оценкам – до 20 °C [3].

Количественная оценка перспектив нефтегазоносности (подсчет ресурсов углеводородов (УВ) и районирование) регионов, крупных территорий и зон нефтегазонакопления выполняется объемногенетическим методом (бассейновое моделирование), а также его модификациями с комплексированием способов классической геологии [3, 4 и др.]. Количество генерированных УВ определяется на основе реконструкции геотемпературного режима нефтематеринских отложений.

Накоплен значительный исследовательский материал, показывающий влияние палеоклимата на температурный режим осадочно-вулканогенных и магматических комплексов [5–9]. В этих работах выполнены в основном реконструкции изменения фундаментального геодинамического параметра – теплового потока через земную поверхность, в связи с климатическими изменениями в плейстоцен-голоцене. Опубликован ряд работ [10–12], показывающих влияние мезозойско-кайнозойских климатических изменений на термическую историю непосредственно нефтематеринских отложений.

Зарубежные системы бассейнового моделирования, используемые для определения ресурсов УВ юрско-меловых комплексов Западной Сибири, не учитывают мезозойско-кайнозойские климатические условия [13]. Эти программные комплексы не позволяют количественно моделировать климатические события, приводящие к существенному изменению геотемпературного поля во всем осадочном чехле.

Ряд ученых, занимающихся моделированием термической истории осадочных бассейнов Западной Сибири и других нефтегазоносных провинций, учитывают вековой ход температур на поверхности Земли [14–16]. При этом используются отечественные системы бассейнового моделирования [17 и др.]. Применяемый здесь вековой ход температур можно условно назвать «стандартным», т. к. он не учитывает особенностей региональных палеоклиматических зон [18].

Качественное рассмотрение процессов позднечетвертичного климатического похолодания позволяет выделить три основных фактора палеоклимата, влияющих на температурный режим осадочного чехла, а следовательно, и на термическую историю нефтематеринских отложений, на степень реализации их генерационного потенциала. 1-й фактор – это вековой ход температур на поверхности Земли, обуславливающий солярный источник тепла для процессов генерации УВ. 2-й фактор – это толщи вечномерзлых пород, перекрывающих материнские отложения и обладающих аномально высокой теплопроводностью. 3-й фактор – это ледниковые покровы, своеобразные литолого-стратиграфические комплексы, существенно увеличивающие мощность перекрывающих отложений.

#### Постановка задачи

К настоящему времени проведены целевые исследования 1-го фактора палеоклимата - влияния векового хода температур на земной поверхности на геотермический режим баженовских и тогурских нефтематеринских отложений южносибирской палеоклиматической зоны - юго-востока Западной Сибири, на примере районов нефтепромыслов Томской и Новосибирской областей [19-21]. Количественная оценка выполнена на основе анализа вариабельности результатов математического моделирования - результатов палеотемпературных реконструкций при трех основных допущениях: 1) вековой ход температур не учитывается; 2) палеоклимат учитывается по «стандартному» вековому ходу температур; 3) палеоклимат учитывается по «местному» вековому ходу температур, полученному для южно-сибирской палеоклиматической зоны [22]. Результаты этих исследований позволили сделать следующие выводы.

- Установлено существенное влияние векового хода температур на расчетный геотермический режим и степень реализации генерационного потенциала баженовской и тогурских свит, формирующей залежи углеводородов нефтегазоносных комплексов юго-востока Западной Сибири. Показано, что неучет палеоклимата не позволяет адекватно восстановить термическую историю материнских отложений. Это может занижать до 2-х раз и более величины расчетных ресурсов объемно-генетическим методом.
- Получены результаты, указывающие на необходимость учета данных отражательной способности витринита (ОСВ) для корректного восстановления термической истории нефтематеринских отложений. Показано, что неучет данных ОСВ («максимального палеотермометра») может приводить к существенным ошибкам в оценке ресурсов, вплоть до «пропуска» ресурсов.
- 3. Показано, что при определении ресурсов углеводородов на землях юго-востока Западной Сибири предпочтительно применять «местный» вековой ход температур на земной поверхности, построенный для южной палеоклиматической зоны Западной Сибири. Это позволит более корректно учесть историю главной фазы нефтеобразования (ГФН) и не завышать/занижать (до 30-40 %) расчетные ресурсы.

Цель настоящих исследований – определить влияние 2-го фактора палеоклимата – неоплейстоценовой толщи мерзлоты – на расчетный геотермический режим и степень реализации генерационного потенциала баженовских отложений юго-востока Западной Сибири.

По последним данным [23] вечная мерзлота присутствовала не только в центральной части и на юге Западной Сибири, четвертичное оледенение заходило в пределы севера и северо-востока Казахстана, следы покровного оледенения отмечаются и в центральном Казахстане.

Количественная оценка влияния неоплейстоценовой толщи мерзлоты на расчетный геотермический режим и степень реализации генерационного потенциала баженовских отложений выполняется на основе анализа вариабельности результатов следующих четырех вариантов палеотемпературных реконструкций. Вариант 1 – учет векового хода температур на поверхности Земли, учет неоплейстоценовой мерзлоты мощностью до 300 м. Вариант 2 – учет векового хода температур, без учета мерзлоты. Вариант 3 – без учета векового хода температур, без учета мерзлоты. Вари ант 4 – учет векового хода температур, учет неоплейстоценовой мерзлоты с гипотетической мощностью до 1000 м.

Первым основным критерием адекватности и
предпочтительности результатов из четырех вари-
антов выступает оптимальная согласованность
максимума расчетных геотемператур с «наблюден-
ными» температурами «максимального палеотер-
мометра» – с температурами, определенными по
ОСВ. В той же степени важна оптимальная согла-
сованность («невязка» [24-26]) расчетных геотем-
ператур и с «наблюденными» пластовыми темпе-
ратурами. В качестве второго основного критерия
принята степень согласованности очагов интенсив-
ной генерации УВ, выделяемых по геотемператур-
ному критерию [27], с установленной геологора-
зведкой нефтегазоносностью недр.

#### Краткая характеристика объекта исследований

Моделирование палеогеотемпературных условий материнских баженовских отложений выполнено для осадочных разрезов глубоких скважин Лугинецкой 183 и Верх-Тарской 7 (рис. 1, табл. 1).

В Томской области нефтепромыслы сосредоточены главным образом в Нюрольской мегавпадине и на структурах ее обрамления. Основным источником формирования залежей УВ в ловушках верхнеюрского и мелового нефтегазоносных комплексов (НГК) являются нефтематеринские породы баженовской свиты ( $J_3v$ ). Генерационный по-

Характеристики	Исследуемые скважины/Wells					
Features	Лугинецкая 183 Luginetskaya 183	Верх-Тарская 7 Verkh-Tarskaya 7				
Забой, м/Bottom hole, m	2500	2821				
Отложения на забое (свита) Sediments on the bottom hole (suite)	Средняя юра (тюменская) Middle Jurassic (Tyumenskaya)	Палеозой (PZ) Paleozoic				
Кровля баженовской свиты, м Suite top, m	2313	2408				
Мощность баженовской свиты, м Thickness of Bazhenovskaya suite, m	16	58				
Результаты испытаний (свита; пласт; тип флюида; де- бит, м³/сут.) Test results (suite; reservoir; fluid type; flow rate, m³/day.)	Васюганская; Ю;²; нефть; 11,5 Васюганская; Ю;²; нефть; 13,0 Vasyuganskaya J <sub>1</sub> ²; oil; 11,5 Vasyuganskaya J <sub>1</sub> ²; oil; 13,0	Васюганская; Ю <sub>1</sub> ; нефть; 264,0 Васюганская; Ю <sub>1</sub> ; нефть; 40,8 Васюганская; Ю <sub>1</sub> ; нефть; 40,8 Vasyuganskaya J <sub>1</sub> ; oil; 264,0 Vasyuganskaya J <sub>1</sub> ; oil; 40,8 Vasyuganskaya J <sub>1</sub> ; oil; 40,8				
Измеренные пластовые температуры (свита; глубина замера; пластовая температура) Measured reservoir temperatures (suite; measurement depth; reservoir temperature)	Куломзинская; 2200 м; 77 °С Тюменская; 2350 м; 84 °С Kulomzinskaya; 2200 m; 77 °C Tyumenskaya; 2350 m; 84 °C	Васюганская; 2488 м; 80 °С Васюганская; 2485 м; 85 °С Васюганская; 2485 м; 85 °С Vasyuganskaya; 2488 m; 80 °С Vasyuganskaya; 2485 m; 85 °C Vasyuganskaya; 2485 m; 86 °C				
«Измеренные» температуры по ОСВ (свита; глубина от- бора; ( $R^{o}_{vt}$ ); температура) «Measured» temperatures by vitrinite reflectance (suite; sampling depth; ( $R^{o}_{vt}$ ); temperature)	Васюганская; 2345 м; (0,63); 98 °C Vasyuganskaya; 2345 m; (0,63); 98 °C	Тюменская; 2735 м; (0,70); 106 °C Tyumenskaya; 2735 m; (0,70); 106 °C				

Таблица 1. Характеристики разрезов глубоких скважин

**Table 1.**Features of deep well logs

Примечание. Данные испытаний, пластовые температуры приняты из первичных «Дел скважин» (материалы Томского филиала ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по СФО»). Данные ОСВ (R<sup>0</sup><sub>vt</sub>) определены в Лаборатории геохимии нефти и газа Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (г. Новосибирск).

Note. The test data, reservoir temperatures are taken from the primary «Well history» (materials of Tomsk branch of the «territorial fund of geological information by SFD»). The vitrinite reflectance data (VRD) ( $R_{vt}^{0}$ ) were determined in the laboratory of oil and gas geochemistry at the Institute of oil-and-gas geology and geophysics SB RAS (Novosibirsk).

тенциал этих отложений обусловлен высоким содержанием сапропелевого материала ( $C_{\rm opr}$  до 12%), их повсеместным распространением и мощностью до 30 м [28]. На Лугинецком месторождении, расположенном в пределах Пудинского мезоподнятия, залежи УВ связаны в основном с верхнеюрскими коллекторами (горизонт Ю<sub>1</sub>).



- *Рис.* 1. Обзорная схема территории исследований (на основе [28]): 1 – структуры: а) I; б) II порядка; 2 – реки; 3 – исследуемые скважины: Лу-183 – Лугинецкая 183, ВТ-7 – Верх-Тарская 7; 4 – административная граница между Томской и Новосибирской областями
- Fig. 1. Review scheme of the studied territory (according to [28]): 1 are the structures of the: a) I; δ) II order; 2 are the rivers; 3 are the wells: Лу-183 Luginetskaya 183, BT-7 Verkh-Tarskaya 7; 4 is the administrative boundary between Tomsk and Novosibirsk regions

В Новосибирской области все открытые залежи УВ сосредоточены на севере. Верх-Тарское месторождение нефти является наиболее крупным. Оно приурочено к одноименной локальной структуре, осложняющей Межовский мегавыступ. Промышленными НГК на Верх-Тарском месторождении являются верхнеюрский (горизонт Ю<sub>1</sub>) и палеозойский (пласт М). Основным источником УВ для залежи горизонта Ю<sub>1</sub> служит рассеянное органическое вещество (РОВ) баженовской свиты. Ее мощность в скважинах колеблется от 40 до 58 м. Содержание  $C_{opr}$  достигает 15–20 % [29].

Мощность толщи мерзлоты в неоплейстоцене принята по А.А. Шарбатяну [30] (табл. 2).

#### Методика исследований

Восстановление термической истории баженовских отложений выполняется на основе палеотектонических и палеотемпературных реконструкций. Применен метод палеотемпературного моделирования [31–33], в котором в математическую модель непосредственно включены климатический вековой ход температур на земной поверхности (граничное условие) и палеотемпературы определений ОСВ, как «наблюденные».

Таблица 2. Изменение во времени мощности многолетнемерзлых пород (район Широтного Приобья, 61° с.ш.) [30]

 Table 2.
 Time change of permafrost thickness (region of Shirotnoe Priobe 61° N) [30]

Время, тыс. лет назад Time, thou- sand years ago	Глубина положения нижней кромки мер- злоты, м Depth of frost unde- redge location, m	Вековой ход температур на земной поверхности, °C Secular curve of temperatu- res on the Earth surface, °C
245	0	0
235	350	-10,0
210	450	-5,5
190	550	-8,5
165	450	-4,5
145	400	-3,5
130	350	-1,0
110	300	-3,9
95	300	-0,7
70	250	-4,0
50	250	-1,0
30	200	-4,3
5	0	+2,5

В модели процесс распространения тепла в слоистой осадочной толще описывается начальнокраевой задачей для уравнения

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

где  $\lambda$  – теплопроводность; a – температуропроводность; f – плотность тепловыделения внутренних (радиоактивных) источников тепла; U – температура; Z – расстояние от основания осадочного разреза; t – время. С краевыми условиями

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

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

где q(t) – тепловой поток из основания осадочного разреза;  $\varepsilon = \varepsilon(t)$  – верхняя граница осадочной толщи (поверхность осадконакопления, дневная поверхность). Отсюда видно, палеотектонические реконструкции непосредственно сопряжены с палеотемпературными реконструкциями. Алгоритм палеотектонических реконструкций основывается на «методе выравнивания профилей» по В.Б. Нейману (1984).

Осадочная толща описывается мощностями стратиграфических комплексов  $h_i$ , для каждого из которых заданы теплопроводность  $\lambda_i$ , температуропроводность  $a_i$ , плотность тепловыделения ра-

- **Рис. 2.** Схематическое изображение слоистого осадочного разреза при палеотемпературном моделировании:  $\varepsilon = \varepsilon(t) верхняя граница осадочной толщи; t время осадконакопления; U температура; q тепловой поток; Z<sub>i</sub> точки расчета температур; h<sub>i</sub> мощность; v<sub>i</sub> скорость осадконакопления; <math>\lambda_i$  теплопроводность; a<sub>i</sub> температуропроводность; f<sub>i</sub> плотность тепловыделения радиоактивных источников
- **Fig. 2.** Diagram of layered sedimentary section at paleotemperature modeling:  $\varepsilon = \varepsilon(t)$  is the upper boundary of sedimentation mass; t is the sedimentation time; U is the temperature; q is the thermal flow;  $Z_i$  are the points of temperature calculation;  $h_i$  is the power;  $v_i$  is the sedimentation rate;  $\lambda_i$  is the thermal conductivity;  $a_i$  is the temperature diffusivity;  $f_i$  is the density of heat release of radioactive sources

диоактивных источников  $f_i$  в породах и время осадконакопления  $t_i$  (рис. 2). Скорость осадконакопления  $v_i$  может быть нулевой и отрицательной, что позволяет учитывать перерывы осадконакопления и денудацию.

Параметризация осадочного разреза, вскрытого скважиной, определяющая параметры седиментационной и теплофизической модели (1)–(3), принимается в соответствии со стратиграфической разбивкой скважины по первичным «Делам скважин» и «Каталогам литолого-стратиграфических разбивок скважин» (табл. 3). Возраст пород и соответствующие вековые интервалы шкалы геологи-



ческого времени [34], увязанные с периодами геохронологической шкалы Стратиграфического кодекса (1992 г.), определяют время и скорости осадконакопления. Литология и плотность пород выделенных свит и толщ принимается по материалам обобщения петрофизических определений керна и каротажа.

Таблица 3. Пример параметрического описания седиментационной истории и теплофизических свойств осадочной толщи, вскрытой скважиной Лугинецкая 183 (без учета неоплейстоценого промерзания осадочного чехла)

	penetrated by the well Luginetskaya 18	3 (withou	it reference	to neo-Pleis	stocene fro	ost penetratio	n into sedimer	tary cover)
Table 3.	Example of parametric representation	of sedim	entation his	story and th	ermal-phy	sical properti	es of sedimen	tation mass

Свита, толща* (стратиграфия) Suite, formation* (stratigraphy)	Мощ- ность, м Thic- kness, m	Возраст, млн лет на- зад Age, millions ye- ars ago	Время на- копления, млн лет Storage ti- me, million years	Плот- ность, г/см <sup>3</sup> Density, g/cm <sup>3</sup>	Теплопро- водность, Вт/м•град Thermal conductivity, W/m•deg	Температуро- проводность, M <sup>2</sup> /c Temperature diffusivity, m <sup>2</sup> /s	Тепловы- деление, Вт/м <sup>3</sup> Heat rele- ase, W/m <sup>3</sup>
Четвертичные Q/Quarternary Q	25	1,64-0	1,64	2,02	1,27	6,5e-007	1,1e-006
Плиоценовые N <sub>2</sub> /Pleistocene N <sub>2</sub>	-	1,64-4,71	3,07	-	-	-	-
Миоценовые N <sub>1</sub> /Miocene N <sub>1</sub>	-	4,71-24,0	19,29	-	-	-	-
Некрасовская <i>nk Pg</i> ₃/Nekrasovskaya <i>nk Pg</i> ₃	84	24,0-32,2	8,3	2,09	1,35	7e-007	1,2e-006
Чеганская+Люлинворская+Талицкая hg ll tl Pg <sub>3-1</sub> Cheganskaya+Lyulinvorskaya+Talitskaya hg ll tl Pg <sub>3-1</sub>	173	32,2-61,7	29,4	2,09	1,35	7e-007	1,2e-006
Славгородская +Ипатовская +Кузнецовская sl ip kz K <sub>2</sub> Slavgorodskaya+Ipatovskaya+Kuznetsovskaya sl ip kz K <sub>2</sub>	364	73,2-91,6	29,9	2,15	1,4	7e-007	1,25e-006
Покурская <i>pk K</i> <sub>1-2</sub> /Pokurskaya <i>pk K</i> <sub>1-2</sub>	803	91,6-114,1	22,5	2,26	1,49	8e-007	1,25e-006
Алымская a <sub>1,2</sub> K <sub>1-2</sub> /Alymskaya a <sub>1,2</sub> K <sub>1-2</sub>	-	114,1-120,2	6,1	-	-	-	-
Киялинская <i>kls K</i> 1/Kiyalinskaya <i>kls K</i> 1	550	120,2-132,4	12,2	2,39	1,6	8e-007	1,25e-006
Тарская <i>tr K</i> 1/Tarskaya <i>tr K</i> 1	74	132,4-136,1	3,7	2,44	1,62	8e-007	1,25e-006
Куломзинская <i>klmK</i> 1/Kulomzinskaya <i>klmK</i> 1	237	136,1-145,8	9,7	2,44	1,64	8e-007	1,25e-006
Баженовская <i>bg J</i> ₃/Bazhenovskaya <i>bg J</i> ₃	16	145,8-151,21	5,4	2,42	1,62	8e-007	1,3e-006
Георгиевская <i>gr J</i> ₃/Georgievskaya <i>gr J</i> ₃	-	151,2-156,6	5,4	-	-	-	-
Васюганская vs J <sub>3-2</sub> /Vasyuganskaya vs J <sub>3-2</sub>	55	156,6-163,3	11,7	2,42	1,6	8e-007	1,3e-006
Тюменская <i>tm J</i> <sub>2</sub> /Tyumenskaya <i>tm J</i> <sub>2</sub>	115	168,3-172,0	3,7	2,46	1,64	8e-007	1,3e-006

Примечание. Заливкой показано время накопления отложений баженовской свиты и ее параметрическое описание.

Note. Sediment accumulation time of Bazhenovskaya suite and its parametric representation are marked in yellow.

**Таблица 4.** Параметрическое описание седиментационной истории и теплофизических свойств осадочной толщи, вскрытой скважиной Лугинецкая 183 (мощность неоплейстоценовой мерзлоты 300 м)

Table 4.	
----------	--

. Parametric representation of sedimentation history and thermal-physical properties of sedimentation mass, penetrated by the well Luginetskaya 183 (thickness of neo-Pleistocene frost penetration is 300 m)

Свита, толща (стратиграфия) Suite, formation (stratigraphy)	Мощ- ность, м Thic- kness, m	Возраст, млн лет назад Age, millions ye- ars ago	Время на- копления, млн лет Storage ti- me, million years	Плот- ность, г/см <sup>3</sup> Density, g/cm <sup>3</sup>	Теплопро- водность, Вт/м•град Thermal con- ductivity, W/m•deg	Температу- ропровод- ность, м <sup>2</sup> /с Temperatu- re diffusivi- ty, m <sup>2</sup> /s	Тепловы- деление, Вт/м <sup>3</sup> Heat rele- ase, W/m <sup>3</sup>
	-	0,052-0,00	0,052	-	-	-	-
Четвертичные Q Quarternary Q	300	0,055-0,052	0,003	2,10	1,3	7e-007	1,22e-006
	-300	0,0565-0,055	0,0015	2,10	2,09	1,05e-006	1,22e-006
	-	0,2355-0,0565	0,179	-	-	-	-
	300	0, 2385-0,2355	0,003	2,10	2,09	1,05e-006	1,22e-006
	-300	0,24-0, 2385	0,0015	2,10	1,3	7e-007	1,22e-006
	25	1,64-0,24	1,4	2,02	1,27	6,5e-007	1,1e-006
Плиоценовые N <sub>2</sub> /Pleistocene N <sub>2</sub>	-	1,64-4,71	3,07	-	-	-	-
Миоценовые N <sub>1</sub> /Miocene N <sub>1</sub>	-	4,71-24,0	19,29	-	-	-	-
Некрасовская <i>nk Pg</i> ₃/Nekrasovskaya <i>nk Pg</i> ₃	84	24,0-32,2	8,3	2,09	1,35	7e-007	1,2e-006
Чеганская+Люлинворская+Талицкая <i>hg ll tl Pg</i> <sub>3-1</sub> Cheganskaya+Lyulinvorskaya+Talitskaya <i>hg ll tl Pg</i> <sub>3-1</sub>	173	32,2-61,7	29,4	2,09	1,35	7e-007	1,2e-006
Славгородская +Ипатовска +Кузнецовская sl ip kz $K_2$ Slavgorodskaya +Ipatovskaya +Kuznetsovskaya sl ip kz $K_2$	364	73,2-91,6	29,9	2,15	1,4	7e-007	1,25e-006
Покурская <i>pk К</i> <sub>1-2</sub> /Pokurskaya <i>pk К</i> <sub>1-2</sub>	803	91,6-114,1	22,5	2,26	1,49	8e-007	1,25e-006
Алымская a <sub>1,2</sub> K <sub>1-2</sub> /Alymskaya a <sub>1,2</sub> K <sub>1-2</sub>	-	114,1-120,2	6,1	-	-	-	-
Киялинская <i>kls K</i> 1/Kiyalinskaya <i>kls K</i> 1	550	120,2-132,4	12,2	2,39	1,6	8e-007	1,25e-006
Тарская tr K <sub>1</sub> /Tarskaya tr K <sub>1</sub>	74	132,4-136,1	3,7	2,44	1,62	8e-007	1,25e-006
Куломзинская <i>klmK</i> 1/Kulomzinskaya <i>klmK</i> 1	237	136,1-145,8	9,7	2,44	1,64	8e-007	1,25e-006
Баженовская <i>bg J</i> ₃/Bazhenovskaya <i>bg J</i> ₃	16	145,8-151,21	5,4	2,42	1,62	8e-007	1,3e-006
Георгиевская gr J <sub>3</sub> /Georgievskaya gr J <sub>3</sub>	-	151,2-156,6	5,4	_	-	-	-
Васюганская vs J <sub>3-2</sub> /Vasyuganskaya vs J <sub>3-2</sub>	55	156,6-168,3	11,7	2,42	1,6	8e-007	1,3e-006
Тюменская $tm J_2/Tyumenskaya tm J_2$	115	168,3-172,0	3,7	2,46	1,64	8e-007	1,3e-006

Примечание. Синей заливкой показаны времена «мгновенного» формирования и «мгновенной» деградации толщи неоплейстоценовой мерзлоты. Коричневой заливкой показано время существования толщи мерзлоты.

Note. Times of «instantaneous» formation and «instantaneous» degradation of neo-Pleistocene frost formation are marked in blue. Time of existence of frost thickness is marked in brown.

При отсутствии экспериментальных определений теплопроводности  $\lambda_i$  используем петрофизические зависимости теплопроводности осадков от их плотности  $\sigma$ . Эти зависимости получены в интервале плотностей 1,5–2,6 г/см<sup>3</sup> как для песчанистых отложений, так и для алевролито-аргиллитовых толщ [35]. Коэффициенты температуропроводности  $a_i$ , плотности тепловыделения радиоактивных источников  $f_i$  также определяются литологией стратиграфических комплексов.

Формирование, существование, деградация толщи вечномерзлых пород учитываются как своеобразный литолого-стратиграфические комплекс (табл. 4 и 5), обладающий аномально высокими значениями теплопроводности 1? и температуропроводности а.

В варианте 1 (табл. 4, 5) приняли мощность толщи мерзлоты 300 м. Формализованный учет толщи мерзлоты осуществляется, начиная с 240 тыс. лет назад, «мгновенной» (по меркам геологического времени, за 1,5+3,0 тыс. лет) заменой «нормальных» осадочных отложений толщей мерзлых пород со своими теплофизическими характеристиками – теплопроводность, температуропроводность [36]. Затем эта толща мерзлых пород перекрывает осадочный чехол в течение 179 тыс. лет. Далее «мгновенно» (1,5+3,0 тыс. лет) толща вечной мерзлоты заменяется «нормальными» осадочными отложениями. И далее существует «нормальный» осадочных чехол до настоящего времени, в последние 52 тыс. лет.

В *варианте* 4 (табл. 6) взяли мощность мерзлоты в 1000 м. Формализованный учет толщи мерзлоты осуществляется также, как и для предыдущего варианта, начиная с 240 тыс. лет назад. Замена «нормальных» осадочных отложений толщей мерзлоты осуществлялась по геологическому времени за 5,0+3,0 тыс. лет. После этого толща мер-

**Таблица 5.** Параметрическое описание седиментационной истории и теплофизических свойств осадочной толщи, вскрытой скважиной Верх-Тарская 7 (мощность неоплейстоценовой мерзлоты 300 м)

rapie
-------

5. Parametric representation of sedimentation history and thermal-physical properties of sedimentation mass, penetrated by the well Verkh-Tarskaya 7 (thickness of neo-Pleistocene frost penetration is 300 m)

Свита, толща (стратиграфия) Suite, formation (stratigraphy)	Мощ- ность, м Thic- kness, m	Возраст, млн лет назад Age, millions years ago	Время на- копления, млн лет Sto- rage time, million years	Плотность, г/см <sup>3</sup> Density, g/cm <sup>3</sup>	Теплопро- водность, т/м•град Thermal conductivity, t/m•deg	Температу- ропровод- ность, м <sup>2</sup> /с Temperature diffusivity, m <sup>2</sup> /s	Тепловыде- ление, Вт/м <sup>3</sup> Heat rele- ase, W/m <sup>3</sup>
	-	0,052-0,00	0,052	-	-	-	-
	300	0,055-0,052	0,003	2,10	1,3	7e-007	1,22e-006
	-300	0,0565-0,055	0,0015	2,10	2,09	1,05e-006	1,22e-006
Четвертичные Q Quarternary Q	-	0,2355-0,0565	0,179	-	-	-	-
	300	0,2385-0,2355	0,003	2,10	2,09	1,05e-006	1,22e-006
	-300	0,24-0, 2385	0,0015	2,10	1,3	7e-007	1,22e-006
	20	1,64-0,24	1, 4	2,02	1,27	6,5e-007	1,1e-006
Плиоценовые N <sub>2</sub> /Pleistocene N <sub>2</sub>	-	1,64-4,71	3,07	-	-	-	-
Миоценовые N <sub>1</sub> /Miocene N <sub>1</sub>	-	4,71-24,0	19,29	-	-	-	-
Некрасовская <i>nk Pg</i> ₃/Nekrasovskaya <i>nk Pg</i> ₃	130	24,0-32,3	8,3	2,09	1,35	7e-007	1,2e-006
Чеганская <i>hg</i> Pg <sub>3-2</sub> /Cheganskaya <i>hg</i> Pg <sub>3-2</sub>	70	32,3-41,7	9,4	2,09	1,35	7e-007	1,2e-006
Люлинворская <i>IIPg</i> 2/Lyulinvorskaya <i>IIPg</i> 2	50	41,7-54,8	13,1	2,09	1,35	7e-007	1,2e-006
Талицкая <i>tl Pg</i> 1/Talitskaya <i>tl Pg</i> 1	20	54,8-61,7	6,9	2,09	1,35	7e-007	1,2e-006
Ганькинская $gnP_1 - K_2$ /Gankinskaya $gnP_1 - K_2$	106	61,7-73,2	11,5	2,11	1,37	7e-007	1,25e-006
Славгородская <i>sl K</i> <sub>2</sub> /Slavgorodskaya <i>sl K</i> <sub>2</sub>	62	73,2-86,5	13,3	2,11	1,37	7e-007	1,25e-006
Ипатовская <i>ip K</i> <sub>2</sub> /Ipatovskaya <i>ip K</i> <sub>2</sub>	162	86,5-89,8	3,3	2,18	1,4	7e-007	1,25e-006
Кузнецовская <i>kz К</i> 2/Kuznetsovskaya <i>kz К</i> 2	33	89,8-91,6	1,8	2,18	1,43	8e-007	1,25e-006
Покурская <i>pk K</i> <sub>1-2</sub> /Pokurskaya <i>pk K</i> <sub>1-2</sub>	846	91,6-114,1	22,5	2,26	1,49	8e-007	1,25e-006
Алымская а $_2K_1$ /Alymskaya а $_2K_1$	-	114,1-116,3	2,2	-	-	-	-
Алымская а <sub>1</sub> <i>K</i> <sub>1</sub> /Alymskaya а <sub>1</sub> <i>K</i> <sub>1</sub>	-	116,3-120,2	3,9	-	-	-	-
Киялинская <i>kls K</i> 1/Kiyalinskaya <i>kls K</i> 1	673	120,2-132,4	12,2	2,39	1,6	8e-007	1,25e-006
Тарская <i>tr K</i> 1/Tarskaya <i>tr K</i> 1	51	132,4-136,1	3,7	2,44	1,62	8e-007	1,25e-006
Куломзинская <i>klmK</i> 1/Kulomzinskaya <i>klmK</i> 1	185	136,1-145,8	9,7	2,44	1,64	8e-007	1,25e-006
Баженовская <i>bg J</i> ₃/Bazhenovskaya <i>bg J</i> ₃	58	145,8-151,2	5,4	2,42	1,62	8e-007	1,3e-006
Георгиевская gr J <sub>3</sub> /Georgievskaya gr J <sub>3</sub>	15	151,2-156,6	5,4	2,42	1,62	8e-007	1,3e-006
Васюганская vs J <sub>3</sub> /Vasyuganskaya vs J <sub>3</sub>	59	156,6-162,9	6,3	2,42	1,6	8e-007	1,3e-006
Тюменская <i>tm J</i> <sub>1-2</sub> /Tyumenskaya <i>tm J</i> <sub>1-2</sub>	202	162,9-208,0	45,1	2,46	1,64	8e-007	1,3e-006

Примечание. Те же, что к табл. 4.

Note. The same as for table 4.

злых пород перекрывает осадочный чехол в течение 206 тыс. лет, затем вечная мерзлота заменяется (за 5,0+3,0 тыс. лет) «нормальными» осадочными отложениями. И далее существует современный разрез 18 тыс. лет.

Краевое условие (2) определяется температурой поверхности осадконакоплении, т. е. определяется палеоклиматом, и задается в виде кусочно-линейной функции «местного» векового хода температур на поверхности Земли [22].

Здесь задачи решаются в предположении квазипостоянства значения плотности теплового потока из основания, начиная с юрского времени [10]. В этом случае решение обратной задачи (расчет плотности глубинного теплового потока q) определяется из условия

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

где  $T_i$  – «наблюденные» значения температур в  $k_t$  точках на различных глубинах  $Z_i$  в моменты времени  $t=\tau$ . Решение обратной задачи (4) строится с учетом того, что функция U(Z,t,q), являющаяся решением прямой задачи (1) с краевыми условиями (2) и (3), в этом случае линейно зависит от q. Поэтому неизвестный параметр q определяется однозначно.

Важно отметить, что модель (1)-(4) не требует априорных сведений о природе и величинах глубинного теплового потока q, что существенно уменышает неоднозначность результатов моделирования.

**Таблица 6.** Пример параметрического описания седиментационной истории и теплофизических свойств осадочной толщи, вскрытой скважиной Лугинецкая 183 (мощность неоплейстоценовой мерзлоты 1000 м)

T	a	b	le	6.

**5.** Parametric representation of sedimentation history and thermal-physical properties of sedimentation mass, penetrated by the well Luginetskaya 183 (thickness of neo-Pleistocene frost penetration is 1000 m)

Свита, толща (стратиграфия) Suite, formation (stratigraphy)	Мощ- ность, м Thic- kness, m	Возраст, млн лет назад Age, millions years ago	Время на- копления, млн лет Storage ti- me, million years	Плот- ность, г/см <sup>3</sup> Density, g/cm <sup>3</sup>	Теплопро- водность, т/м•град Thermal conductivi- ty, t/m•deg	Температу- ропровод- ность, м <sup>2</sup> /с Temperatu- re diffusivi- ty, m <sup>2</sup> /s	Тепловы- деление, Вт/м <sup>3</sup> Heat rele- ase, W/m <sup>3</sup>
	-	0,018-0,0	0,018	-	-	-	-
	1000	0,021-0,018	0,003	2,20	1,3	7e-007	1,22e-006
	-1000	0,026-0,021	0,005	2,20	2,09	1,05e-006	1,22e-006
Четвертичные Q/Quarternary Q	-	0,232-0,026	0,206	-	-	-	-
	1000	0,235-0,232	0,003	2,20	2,09	1,05e-006	1,2e-006
	-1000	0,24-0,235	0,005	2,20	1,3	6,5e-007	1,2e-006
	25	1,64-0,24	1,4	2,02	1,27	6,5e-007	1,1e-006
Плиоценовые N <sub>2</sub> /Pleistocene N <sub>2</sub>	-	1,64-4,71	3,07	-	-	-	-
Миоценовые N <sub>1</sub> /Miocene N <sub>1</sub>	-	4,71-24,0	19,29	-	-	-	-
Некрасовская <i>nk Pg</i> ₃/Nekrasovskaya <i>nk Pg</i> ₃	84	24,0-32,2	8,3	2,09	1,35	7e-007	1,2e-006
Чеганская+Люлинворская+Талицкая <i>hg    tl Pg</i> <sub>3-1</sub> Cheganskaya+Lyulinvorskaya+Talitskaya <i>hg    tl Pg</i> <sub>3-1</sub>	173	32,2-61,7	29,4	2,09	1,35	7e-007	1,2e-006
Славгородская +Ипатовская +Кузнецовская sl ip kz $K_2$ Slavgorodskaya +Ipatovskaya +Kuznetsovskaya sl ip kz $K_2$	364	73,2-91,6	29,9	2,15	1,4	7e-007	1,25e-006
Покурская <i>pk К</i> <sub>1-2</sub> /Pokurskaya <i>pk К</i> <sub>1-2</sub>	803	91,6-114,1	22,5	2,26	1,49	8e-007	1,25e-006
Алымская a <sub>1,2</sub> K <sub>1-2</sub> /Alymskaya a <sub>1,2</sub> K <sub>1-2</sub>	-	114,1-120,2	6,1	-	-	-	-
Киялинская <i>kls K</i> 1/Kiyalinskaya <i>kls K</i> 1	550	120,2-132,4	12,2	2,39	1,6	8e-007	1,25e-006
Тарская tr K <sub>1</sub> /Tarskaya tr K <sub>1</sub>	74	132,4-136,1	3,7	2,44	1,62	8e-007	1,25e-006
Куломзинская <i>klmK</i> 1/Kulomzinskaya <i>klmK</i> 1	237	136,1-145,8	9,7	2,44	1,64	8e-007	1,25e-006
Баженовская <i>bg J</i> ₃/Bazhenovskaya <i>bg J</i> ₃	16	145,8-151,21	5,4	2,42	1,62	8e-007	1,3e-006
Георгиевская <i>gr J</i> <sub>3</sub> /Georgievskaya <i>gr J</i> <sub>3</sub>	-	151,2-156,6	5,4	-	-	-	-
Васюганская vs J <sub>3-2</sub> /Vasyuganskaya vs J <sub>3-2</sub>	55	156,6-168,3	11,7	2,42	1,6	8e-007	1,3e-006
Тюменская <i>tm J</i> <sub>2</sub> /Tyumenskaya <i>tm J</i> <sub>2</sub>	115	168,3-172,0	3,7	2,46	1,64	8e-007	1,3e-006

Примечание. Те же, что к таблице 4.

Note. The same as for table 4.

Для решения обратной задачи геотермии используем в качестве «наблюденных» как измерения пластовых температур, полученные при испытаниях скважин ( $\tau=0$ ), так и палеотемпературы ( $\tau\neq 0$ ), определенные по ОСВ (табл. 1). Способ перехода от ОСВ ( $R_{vl}^0$ ) к соответствующей геотемпературе обоснован вариативными исследованиями и приведен в [37]. В случае использования данных ОСВ указывается время срабатывания «максимального палеотермометра» –  $\tau$ .

Схема расчета палеотемператур отложений баженовской свиты состоит из двух этапов. На первом этапе по распределению «наблюденных» температур  $T_i$  в скважине рассчитывается тепловой поток q через поверхность основания осадочного чехла, т. е. решается обратная задача геотермии. На втором этапе с известным значением q решаются прямые задачи геотермии – непосредственно рассчитываются температуры U в заданных точках осадочной толщи Z (в отложениях баженовской свиты) в заданные моменты геологического времени t.

Решение прямых задач геотермии выполнено на 56 ключевых моментов геологического времени, соответствующих временам начала/завершения формирования каждой свиты, точкам «излома» векового хода температур на земной поверхности и «переломным» моментам формирования и деградации неоплейстоценовой мерзлоты.

Балансовая модель процессов нефтегазообразования [27, 38] позволяет по геотемпературному критерию выполнить выделение очагов интенсивного образования нефтей из РОВ баженовских отложений: с 85 °С – вхождение материнских пород (аквагенное РОВ) в главную зону нефтеобразования (ГЗН).

Для сопоставительной оценки результатов вариантов моделирования – оценки степени согласованности расчетных очагов генерации УВ с установленной геологоразведочными работами нефтегазоносностью недр для каждого варианта реконструкций термической истории материнской свиты – рассчитывается интегральный показатель плотности ресурсов генерированных нефтей (*R*, усл. ед.) по формуле [39, 40]:

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

где U<sub>i</sub> – расчетная геотемпература очага генерации нефти (ГЗН), °С;  $t_i$  – интервальное время действия

Таблица 7. Расчетные геотемпературы баженовской свиты в разрезе скважины Лугинецкая 183 (Томская область)

Designed geotemperatures of bazhenovskaya for-Table 7. mation in the section of the well Luginetskaya 183 (Tomsk region)

илн лет назад llion years ago	д температур на ти Земли [22], °C ure secular trend h surface [22], °C	а положения ской свиты, м Bazhenovskaya on location, m	Геотемпературы баженовской свиты, °C Geotemperature of Bazhenovskaya formation, °C				
лемя, п те, ті	вой хс рхнос iperatu ie Eart	лубин женов oth of ormatic	B	n			
월道	Bekol ToBe Tem on th	fo Der	1	2	3	4	
0	0	2321	80	81	87	75	
0,001	+1	2321	80	81	87	75	
0,003	+2	2321	80	81	87	75	
0,005	+3	2321	80	81	87	75	
0,018	+1	2320	80	81	88	77	
0,03	-2	2321	79	81	88	78	
0,05	-1	2320	79	81	88	78	
0,052	-1	2320	79	81	88	78	
0,055	-1	2321	79	81	88	78	
0,0565	-2	2320	79	81	88	78	
0,07	-4	2319	79	80	88	78	
0,09	-1	2319	79	80	87	78	
0,11	-4	2319	79	80	87	78	
0,13	-1	2319	79	80	87	78	
0,15	-4	2318	80	80	87	78	
0,19	-9	2318	83	81	87	79	
0,21	-6	2317	84	82	87	82	
0,222	-7	2317	85	82	87	82	
0,225	-8	2317	86	82	87	86	
0,235	-10	2317	86	82	87	91	
0,2355	-9	2317	86	82	87	94	
0,2385	-2	2317	86	83	87	94	
0,24	0	2317	86	83	87	95	
1,4	+1	2299	86	83	86	94	
1,64	+1	2296	86	83	86	95	
3,1	+2	2295	88	85	86	96	
3,2	+2	2295	89	89	86	97	
3,8	+12	2295	95	93	86	104	
4,7	+3	2295	88	85	86	96	
5,2	-3	2294	89	86	86	97	
5,7	+7	2294	92	89	86	101	
6,3	+10	2294	94	90	86	102	
7	+4	2294	89	86	86	97	
20	+15	2294	100	97	86	108	
24	+16	2294	101	98	86	110	
31,5	+17	2218	98	95	83	107	

очага - нахождения материнских отложений в ГЗН, млн лет; количество временных интервалов *n* определено числом интервалов геологического времени нахождения материнских отложений в ГЗН. Как следует из формулы (5) расчетное значение плотности генерированных ресурсов (на участке скважины) напрямую зависит от времени на-

Окончание	табл. 7	
Tabla 7		

able /						
ремя, млн лет назад ne, million years ago	зой ход температур на рхности Земли [22], °C perature secular trend e Earth surface [22], °C	пубина положения женовской свиты, м oth of Bazhenovskaya srmation location, m	Ге баже of В	еотемп eновско eotem Bazhe format ариант	ератур pй свит peratur novska ion, °C /Versic	ы ы, °С e ya on
Tir	Bekol noBe Terr on th	Dep fo	1	2	3	4
32,3	+16	2210	97	94	82	105
34	+15	2200	96	93	82	103
37,6	+14	2178	94	91	80	101
41,7	+12	2154	90	87	80	98
42	+11	2158	89	87	80	97
46	+8	2129	86	83	79	93
54,8	+19	2077	95	92	77	102
58	+24	2058	99	96	76	106
61,7	+22	2037	95	92	74	102
73	+15	1899	83	81	69	90
73,2	+16	1897	83	81	68	90
86,5	+22	1735	83	81	62	90
89,8	+22	1694	82	80	61	88
90	+23	1692	82	81	61	88
91,6	+22	1673	79	77	58	85
114,1	+21	870	50	49	29	53
118	+19	869	48	47	29	51
120,2	+19	869	47	47	29	51
132,4	+19	319	29	29	11	30
136,1	+19	245	14	27	8	18
Расчетнь вания, м Rated the mW/m <sup>2</sup>	53,6	52,2	54,8	59,3		

Примечание. Вариант 1 – учет векового хода температур, учет вечной мерзлоты 300 м. Вариант 2 - учет векового хода температур, без учета вечной мерзлоты. Вариант 3 – без учета векового хода температур, без учета вечной мерзлоты. Вариант 4 – учет векового хода температур, учет вечной мерзлоты 1000 м. Заливкой показаны температуры главной зоны нефтеобразования (ГЗН), коричневой заливкой - абсолютный палеотемпературный максимум ГЗН, темно-серой заливкой относительные палеотемпературные максимумы ГЗН.

Note. Version 1 is the regard of temperature secular trend, permafrost regard is 300 m. Version 2 is the regard of temperature secular trend without consideration of permafrost. Version 3 without consideration of temperature secular trend and permafrost. Version 4 is the regard of temperature secular trend, permafrost regard is 1000 m. the temperatures of the main oil formation area (MOFA) are marked with colors, absolute paleotemperature maximum of MOFA is in brown, relative paleotemperature maximums of MOFA are in dark-grey.

хождения материнской свиты в ГЗН и от геотемператур ГЗН. Оценка плотности ресурсов выполняется в условных (относительных) единицах, что представляется корректным для последующего сопоставления результатов вариантов моделирования одного объекта.

#### Влияние неоплейстоценовой толщи мерзлоты на расчетный геотермический режим и степень реализации генерационного потенциала баженовских отложений Лугинецкого месторождения (Томская область)

Анализ расчетных значений плотности теплового потока q из основания осадочного разреза (табл. 7) показывает следующее. В вариантах 1, 3 и 4 тепловой поток увеличивается на 1,4–2,6–7,1 мВт/м<sup>2</sup> (на 3–5–14 %) по отношению к расчетному значению теплового потока варианта 2–52,2 мВт/м<sup>2</sup>.

Анализ термической истории баженовской свиты (табл. 7) в разрезе скважины свидетельствует о том, что в варианте 3 (без учета палеоклимата, т. е. без учета векового хода температур и неоплейстоценовой мерзлоты) материнская свита «пережила» самую короткую и самую «холодную» главную фазу нефтеобразования.

В *вариантах* 1, 2 и 4 (с учетом палеоклимата) баженовская свита имеет «богатые», но разные термические истории ГФН. Главные фазы нефтеобразования этих вариантов имеют разные значения абсолютных максимумов палеотемператур, а также содержат относительные максимумы геотемператур в геологическом прошлом.

В вариантах 1 и 4 присутствие толщи вечномерзлых пород, обладающих высокими значениями теплопроводности  $\lambda$  и температуропроводности *a*, приводит к увеличению расчетных значений плотности теплового потока *q*, что, в свою очередь, увеличивает расчетные геотемпературы материнских отложений. В случае неучета векового хода температур на дневной поверхности (вариант 3) расчетный тепловой поток *q* также увеличивается. Сопоставление расчетных и измеренных геотемператур в скважине приведено в табл. 8. Так как измеренные температуры (включая определенные по ОСВ) и расчетные геотемпературы имеют погрешность порядка ±2 °С, то варианты 3 и 4 решений нельзя признать приемлемыми. В этих вариантах «невязки» превышают оптимальную более чем в 4 раза, а разница с ОСВ (с «максимальным палеотермометром») достигает 11–12 °С.

В случае учета палеоклимата (*варианты* 1 и 2) как «невязки» решений обратных задач (4), так и сходимость с «максимальным палеотермометром» оптимальны и равноценны. Таким образом, сопоставление измеренных и расчетных геотемператур позволяет заключить, что по критерию «невязки» результаты *вариантов* 1 и 2 приемлемы и равноценны. Учет векового хода температур и неоплейстоценовой мерзлоты мощностью до 300 м позволяет корректно восстановить термическую историю баженовских отложений.

Расчет плотности ресурсов генерированных баженовских нефтей R (табл. 9) дает максимальное значение для приемлемого варианта 1 (68 усл. ед.). В этом варианте, помимо учета векового хода температур на дневной поверхности, учтено присутствие неоплейстоценовой мерзлоты мощностью 300 м. Указанное максимальное значение почти на 25 % больше, чем в варианте 2 (55 усл. ед.), в котором учтен только один фактор палеоклима – вековой ход температур. Максимальное значение плотности генерированных ресурсов следует из более «богатой» термической истории баженовской свиты в варианте 1 (табл. 7).

Таким образом, именно *вариант* 1, вполне корректный по сходимости измеренных и расчетных геотемператур и наиболее полно (в контексте проведенных исследований) учитывающий основные факторы палеоклимата, представляет наиболее «богатую» термическую историю материнских отложений, а следовательно, обеспечивает наибольшую подсчетную плотность ресурсов генерирован-

			Вариант (°C)/Version (°C)							
			1		2		3		4	
Глубина, м Depth, m	Измеренные («наблюден- ные») температуры, °С Measured («observed») tempe- ratures, °С	Способ измерения Me- asurement method	Расчетные температуры Rated temperatures	Разница Difference						
2200	77	Пластовые	76	-1	78	+1	83	+6	70	-7
2350	84	Reservoir	81	-3	82	-2	89	+5	76	-8
2345	98	По ОСВ By VRD	101	+3	99	+1	87	-11	110	+12
Среднеквадратическое отклонение («невязка»), °С Mean-square deviation («mis-tie»), °С			±2		±2 ±1		±8		±9	

**Таблица 8.** Сопоставление измеренных и расчетных геотемператур в скважине Лугинецкая 183 (Томская область) **Table 8.** Comparison of the designed and measured geotemperatures in well Luginetskaya 183 (Tomsk region)

ных нефтей. Наличие в результатах *варианта* 1 палеоочагов интенсивной генерации баженовской нефти (табл. 7) хорошо объясняет вскрытую скважиной Лугинецкая 183 промышленную залежь в верхнеюрских отложениях (табл. 1).

- **Таблица 9.** Оценка плотности ресурсов генерированных баженовских нефтей (*R*) для вариантов учета палеоклимата (скважина Лугинецкая 183, Томская область)
- **Table 9.** Estimation of resource density of the generated Bazhenov oil (R) for versions of paleoclimate consideration (well Luginetskaya 183, Tomsk region)

Вариант палеотемпературного моделирования Version of paleotemperature modeling	Расчетные ресурсы ( <i>R</i> ), усл. ед. Rated life ( <i>R</i> ), arb. units	Количество расчетных временных интервалов ( <i>n</i> ) Amount of rated time gaps, ( <i>n</i> )	Период работы палеоочага генерации нефти, млн лет назад Operating period of paleosource of oil generation, million years ago	Время работы палеоочага, млн лет Paleosource run days, million years ago	Максимальные геотемпературы палеоочага, °C Peak geotemperatures of paleosource, °C
1	68	24	61,7-0,222	61,5	101
2	55	19	61,7-54,8 42-3,1	45,8	98
3	27	29	24-0	24,0	87
4	109	23	91,6-0,21	91,4	110

Примечание. Заливкой обозначены варианты, приемлемые и равноценные по оптимальной согласованности расчетных геотемператур как с измеренными пластовыми температурами, так и с геотемпературами, определенными по ОСВ.

Note. The versions, acceptable and equal by optimal conformity of the rated geotemperates both with the measured reservoir temperatures and with the geotemperatures determined by the VRD, are marked with the color.

#### Влияние неоплейстоценовой толщи мерзлоты на расчетный геотермический режим и степень реализации генерационного потенциала баженовских отложений Верх-Тарского месторождения (Новосибирская область)

Из анализа расчетных значений плотности теплового потока q из основания осадочного разреза (табл. 10) следует, что в вариантах 1, 3 и 4 тепловой поток увеличивается на 1,5–2,6–6,5 мВт/м<sup>2</sup> (на 3–5–13 %) по отношению к расчетному значению теплового потока варианта 2–49,3 мВт/м<sup>2</sup>.

Анализ термической истории баженовской свиты (табл. 10) в разрезе скважины свидетельствует о том, что в варианте 3 материнская свита «пережила» самую короткую и самую «холодную» главную фазу нефтеобразования.

В вариантах 1, 2 и 4 (с учетом палеоклимата) баженовская свита имеет разные термические истории ГФН. Главные фазы нефтеобразования этих вариантов имеют разные значения абсолютных максимумов палеотемператур, а также содержат относительные максимумы геотемператур в геологическом прошлом.

В вариантах 1 и 4 присутствие толщи вечномерзлых пород приводит к увеличению расчетных значений плотности теплового потока q, что, в свою очередь, увеличивает расчетные геотемпературы материнских отложений. В случае неучета векового хода температур на дневной поверхности (вариант 3), расчетный тепловой поток q также увеличивается.

Сопоставление расчетных и измеренных геотемператур в скважине Верх-Тарская 7 приведено в табл. 11. Так как измеренные температуры (включая определенные по ОСВ) и расчетные геотемпературы имеют погрешность порядка  $\pm 2$  °С, то варианты 3 и 4 решений нельзя признать приемлемыми. В этих вариантах «невязки» превышают оптимальную в 4 раза, а разница с ОСВ (с «максимальным палеотермометром») достигает 12 °С.

В случае учета палеоклимата (варианты 1 и 2) как «невязки» решений обратных задач (4), так и сходимость с «максимальным палеотермометром» оптимальны и равноценны. Таким образом, сопоставление измеренных и расчетных геотемператур позволяет заключить, что по критерию «невязки» результаты вариантов 1 и 2 приемлемы и равноценны. Учет векового хода температур и неоплейстоценовой мерзлоты мощностью до 300 м позволяет корректно восстановить термическую историю баженовских отложений.

Расчет плотности генерированных баженовских нефтей R (табл. 12) дает максимальное значение для приемлемого варианта 1 (84 усл. ед.). В этом варианте, помимо учета векового хода температур на дневной поверхности, учтено присутствие неоплейстоценовой мерзлоты мощностью 300 м. Указанное максимальное значение на 30 % больше, чем в варианте 2 (64 усл. ед.), в котором учтен только один фактор палеоклимата – вековой ход температур. Максимальное значение плотности генерированных ресурсов следует из более «богатой» термической истории баженовской свиты в варианте 1 (табл. 10).

Таким образом, *вариант* 1, вполне корректный по сходимости измеренных и расчетных геотемператур и наиболее полно учитывающий основные факторы палеоклимата, представляет наиболее «богатую» термическую историю материнских отложений, а следовательно, обеспечивает наибольшую подсчетную плотность генерированных нефтей. Наличие в результатах *варианта* 1 палеоочагов интенсивной генерации баженовской нефти (табл. 12) хорошо объясняет вскрытую скважиной Верх-Тарская 7 промышленную залежь в пласте Ю<sub>1</sub> (табл. 1)

# Сопоставление и обсуждение результатов исследований

В вариантах 1 и 4, как на Лугинецком, так и на Верх-Тарском месторождениях, получено увеличение расчетной плотности теплового потока qпо отношению к расчетному значению теплового

**Таблица 10.** Расчетные геотемпературы баженовской свиты в разрезе скважины Верх-Тарская 7 (Новосибирская область)

Окончание табл. 10

Table 10

 
 Table 10.
 Rated geotemperatures of Bazhenovskaya formation in the section of the well Verkh-Tarskaya 7 (Novosibirsk region)

млн лет назад Illion years ago	д температур на ти Земли [22], °C ure secular trend h surface [22], °C	а положения sckoй свиты, м Bazhenovskaya on location, m	Геотемпературы баженовской свиты, °С Geotemperature of Bazhenovskaya formation, °C				
ле, ті	вой хс рхнос peratu he Eart	лубин женое oth of ormati	B	ариант	/Versic	n	
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	Веко пове Terr on th	fc fc	1	2	3	4	
0	0	2441	81	82	88	77	
0,001	+1	2440	81	82	88	77	
0,003	+2	2440	81	82	88	77	
0,005	+3	2440	81	82	88	77	
0,018	+1	2440	81	82	88	77	
0,03	-2	2440	81	82	88	77	
0,05	-1	2440	81	82	88	77	
0,052	-1	2440	81	82	88	77	
0,055	-1	2440	81	82	88	77	
0,0565	-2	2440	81	82	88	77	
0,07	-4	2440	81	82	88	77	
0,09	-1	2440	81	82	88	77	
0,11	-4	2440	81	82	88	77	
0,13	-1	2440	81	82	88	77	
0,15	-4	2440	81	82	88	77	
0,19	-9	2440	81	82	88	77	
0,21	-6	2440	81	82	88	77	
0,222	-7	2438	81	82	88	77	
0,225	-8	2438	81	82	88	77	
0,235	-10	2438	81	82	88	77	
0,2355	-9	2438	81	82	88	77	
0,2385	-2	2438	81	82	88	77	
0,24	0	2438	81	82	88	77	
1,4	+1	2422	86	83	87	93	
1,64	+1	2420	86	84	87	93	
3,1	+2	2420	88	85	87	95	
3,2	+2	2420	88	85	87	95	
3,8	+12	2420	88	85	87	95	
4,7	+3	2420	94	91	87	101	
5,2	-3	2419	89	86	87	96	

потока *варианта* 2, в котором фактор палеоклимата – неоплейтоценовая мерзлота, не учтен. Увеличение обусловлено рассеиванием тепла через дневную поверхность за счет высокой теплопроводности l? и температуропроводности *а* мерзлой толщи, присутствующей в модели (1)–(4).

И в случаях неучета векового хода температур на дневной поверхности (*вариант 3*) расчетный тепловой поток также увеличен – 54,8 мВт/м<sup>2</sup>. Это объясняется фактическим отсутствием в этом варианте солярного источника тепла (2) в модели палеотемпературных реконструкций (1)–(4). В этом случае минимизация функционала (4) – минимизация «невязки» расчетных U и наблюденных T геотемпе-

емя, млн лет назад ie, million years ago	ой ход температур на хности Земли [22], °C perature secular trend : Earth surface [22], °C	ой ход температур на хности Земли [22], °С вегаture secular trend сеrature secular trend gaженовской свиты, м th of Bazhenovskaya to usarian, °С Bazhenovskaya to usarian, m Babnaн⊥/Action Bazhenovskaya to usarian, °С				
Bpe	Bekob nobep Temp on the	Гл ба¥ Dep	1	2	3	4
5,7	+7	2419	89	86	87	96
6,3	+10	2419	94	91	87	102
7	+4	2419	89	87	87	97
20	+15	2419	100	97	87	108
24	+16	2419	101	98	87	109
31,5	+17	2309	98	95	82	105
32,3	+16	2293	96	93	82	103
34	+15	2276	94	92	81	101
37,6	+14	2254	93	90	80	100
41,7	+12	2224	90	87	79	96
42	+11	2217	88	86	79	95
46	+8	2202	85	82	78	91
54,8	+19	2172	93	91	76	100
58	+24	2159	98	96	76	105
61,7	+22	2151	96	94	76	103
73	+15	2044	86	83	72	92
73,2	+16	2044	86	83	72	92
86,5	+22	1983	89	88	69	96
89,8	+22	1858	85	83	64	91
90	+23	1815	84	82	62	90
91,6	+22	1797	83	81	62	89
114,1	+21	943	51	50	31	54
118	+19	938	49	48	31	52
120,2	+19	938	48	48	31	52
132,4	+19	287	28	28	9	29
136,1	+19	215	25	25	7	26
145,8	+19	44	20	20	1	20
Расчетный тепловой поток из осно- вания, мВт/м <sup>2</sup> Rated thermal flow from the base, mW/m <sup>2</sup>			50,8	49,3	51,9	55,8

Примечание. Те же, что к табл. 7.

Note. The same as in table7.

ратур – «потребовала» большего значения плотности теплового потока из основания *q*. Но это не приводит к повышению расчетных геотемператур материнских баженовских отложений. Просто происходит компенсация энергетического дефицита, созданного отсутствием солярного источника тепла (2).

В вариантах 1, 2 и 4 (с учетом 2-х факторов палеоклимата) баженовская свита имеет разные термические истории ГФН. Такая динамика термической истории ГФН может иметь существенное значение с точки зрения сингенетичности созревания РОВ материнских отложений, генерации УВ и формирования структурных планов площадей нефтесбора, локальных ловушек.

					Banu	ант (°С)	/Versio	n (°C)		
				1	I Dupi	2				1
				1 1	2		5		4	
Глубина, м Depth, m	Измеренные («наблюденные») температуры, °C Measured («observed») temperatu- res, °C	Способ измере- ния Measurement method	Pacчетные температуры Rated temperatures	Разница Difference	Pacчетные температуры Rated temperatures	Разница Difference	Расчетные температуры Rated temperatures	Разница Difference	Расчетные температуры Rated temperatures	Разница Difference
2488	80		82	+2	83	+3		+9	78	-2
2485	85	І Іластовые Весегусіг	82	-3	83	-2	1	+4	78	-7
2485	86	i Nesei voli	82	-4	83	-3	89	+3	78	-8
2735	106	По ОСВ By VRD	110	+4	108	+2		-17	118	+12
Среднеквадратическое отклонение («невязка»), °С Mean-square deviation («mis-tie»), °С			±3		±2		±8		±7	

 Таблица 11. Сопоставление измеренных и расчетных геотемператур в скважине Верх-Тарская 7 (Новосибирская область)

 Table 11.
 Comparison of the measured and rated geotemperatures in the well Verkh-Tarskaya 7 (Novosibirsk region)

- Таблица 12. Оценка плотности ресурсов генерированных баженовских нефтей (R) для вариантов учета палеоклимата (скважина Верх-Тарская 7, Новосибирская область)
- Table 12.
   Estimation of resource density of the generated Bazhenov oil (R) for versions of paleoclimate consideration (well Verk-Tarskaya 7, Novosibirsk region)

Вариант палеотемпературного моделирования Version of paleotemperature modeling	Расчетные ресурсы ( <i>R</i> ), усл. ед. Rated resources ( <i>R</i> ), arb. units	Количество расчетных временных интервалов ( $n$ ) Amount of the rated time intervals ( $n$ )	Период работы палеоочага генерации нефти, млн лет назад Operating period of paleosource of oil generation, million years ago	Время работы палеоочага, млн лет Paleosource run days, million years ago	Максимальные геотемпературы палеоочага, °C Peak geotemperatures of paleosource, °C
1	84	26	89,8-1,4	88,2	101
2	64	20	86,5 <sup>-73,2</sup> 61,7 <sup>-54,</sup> 8 42 <sup>-</sup> 3,1	59,1	98
3	21	35	24-0	24,0	88
4	89	26	91,6-3,1	90,0	109

Примечание. Те же, что к табл. 9.

Note. The same as in table 9.

В целом учет палеоклимата (варианты 1, 2 и 4) обуславливает увеличение расчетного палеотемпературного максимума в истории материнских баженовских отложений на 12(10)–15(13)–24(21) °С. Конечно, последние значения (21, 24 °С) маловероятны для юго-востока Западной Сибири. Тем не менее, полученные нами результаты вполне согласуются с предположением, высказанным А.Э. Конторовичем [3], о существенном влиянии резкого похолодания климата в конце плиоцена на геотермический режим осадочного чехла.

Как следует из сказанного выше, неучет факторов палеоклимата (*вариант* 3) не позволяет построить достаточно строгую физико-математическую модель геотермического режима нефтематеринской баженоской свиты, вскрытой глубокими скважинами в юго-восточной части Западной Сибири.

Таким образом, вариант 1, как на Лугинецком, так и на Верх-Тарском месторождении, наиболее полно учитывает два основных фактора палеоклимата (вековой ход на земной поверхности и неоплейстоценовую мерзлоту). Именно вариант 1 и представляет наиболее «богатую» термическую историю материнских отложений и обеспечивает наибольшую подсчетную плотность ресурсов генерированных нефтей на землях юго-востока Западной Сибири.

Замечание. Может казаться парадоксальным факт существенной разницы расчетных геотемператур ГФН баженовской свиты в вариантах 1, 2 и 4 (табл. 7, 10), ведь абсолютный палеотемпературный максимум ГФН приходится на рубеж олигоцена и миоцена (24 млн лет назад), а вечно мерзлые породы формировались только в неоплейстоцене (0,24 млн лет назад)! Объяснение этому кажущемуся парадоксу следующее. Палеотемпературы баженовской свиты рассчитываются по значению плотности теплового потока из основания осадочного разреза – q. Значение q, в свою очередь, pacсчитано решением классической обратной задачи геофизики (4), где в качестве «наблюденных» температур Т, выступают современные пластовые температуры. На значения этих температур, с неизбежностью, повлияла неоплестоценовая вечная мерзлота. Таким образом, учет в параметрах модели (1)-(4) толщи вечномерзлых пород (табл. 4, 6) это, по аналогии с классической геофизикой, учет при моделировании в «наблюденных» температурах «палеоклиматического фона», обусловленного вечной мерзлотой. А так как вечная мерзлота («фон») в *вариантах* 1, 2 и 4 присутствует по-разному, то и расчетные значения геотемператур ГФН в вариантах 1, 2 и 4 получаются разные.

#### Выводы

- 1. Аналитический обзор проблемы совершенствования подсчета ресурсов УВ юрско-меловых НГК Западной Сибири объемно-генетическим методом, основанном на палеореконструкциях геотермического режима материнских отложений, показал актуальность количественной оценки роли палеоклимата, особенно в позднечетвертичное время.
- Определены три основных палеоклиматических фактора, вероятно существенно влияющих на реконструируемый геотермический режим осадочного разреза, включая нефтематеринские отложения: 1) вековой ход температур на поверхности Земли; 2) формирование и деградация неоплейстоценовой толщи вечномерзлых пород; 3) позднечетвертичные ледниковые покровы.
- Сформулирована задача и определена методика количественной оценки 2-го фактора палеоклимата в реконструкциях геотермического режима нефтематеринских отложений и оценке реализации их генерационного потенциала.
- 4. Методика проведенных исследований основывается на методе палеотемпературного моделирования, наиболее полно учитывающем многочисленные параметры геотермополя, на многовариантности палеотектонических и палеотемпературных реконструкций, на анализе вариабельности результатов, на оценке соответствия результатов общепринятым критериям оптимальности решения обратной задачи геофизики, а также на степени согласованности расчетных очагов генерации нефтей с установленной геологоразведкой нефтегазоносностью недр.
- На представительных примерах мезозойскогокайнозойского разреза юго-востока Западной Сибири (широты Томской и Новосибирской

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Вассоевич Н.Б. Теория осадочно-миграционного происхождения нефти (исторический обзор и современное состояние) // Известия АН СССР. Сер. геол. – 1967. – № 11. – С. 135–156.
- Конторович А.Э., Парпарова Г.М., Трушков П.А. Метаморфизм органического вещества и некоторые вопросы нефтегазоносности (на примере мезозойских отложений Западно-Сибирской низменности) // Геология и геофизика. – 1967. – № 2. – С. 16–29.
- Историко-геологическое моделирование процессов нафтидогенеза в мезозойско-кайнозойском осадочном бассейне Карского моря (бассейновое моделирование) / А.Э. Конторович, Л.М. Бурштейн, Н.А. Малышев, П.И. Сафронов, С.А. Гуськов, С.В. Ершов, В.А. Казаненков, Н.С. Ким, В.А. Конторович, Е.А. Костырева, В.Н. Меленевский, В.Р. Лившиц, А.А. Поляков, М.Б. Скворцов // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54. – № 8. – С. 1179–1226.
- Прищепа О.М. Комплексный способ количественной оценки ресурсов нефти и газа в зонах нефтегазонакопления // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2011. – Т. 6. – № 4. URL: http://www.ngtp.ru/rub/6/44\_2011.pdf (дата обращения: 20.08.2015).

областей) установлено, что неучет векового хода температур на поверхности Земли и толщи неоплейстоценовой мерзлоты не позволяет адекватно восстановить термическую историю материнских баженовских отложений.

- Получены результаты, указывающие на необходимость учета неоплейстоценовой мерзлоты мощностью порядка 300 м для корректного восстановления термической истории нефтематеринских отложений на землях юго-востока Западной Сибири.
- При определении ресурсов УВ объёмно-генетическим методом на землях Томской и Новосибирской областей предпочтительно применять «местный» вековой ход температур и толщу мерзлоты мощностью порядка 300 м. Это позволит более корректно учесть историю главной фазы нефтеобразования и не занижать (до 25–30 %) расчетные ресурсы УВ.

Представляется, что результаты проведенных исследований позволяют сформулировать задачи последующих научных изысканий в интереснейшей области – на стыке нефтегазовой геологии и геофизики и палеоклиматологии. Именно междисциплинарный подход может обеспечить создание ресурсоэффективных технологий поисков и разведки углеводородов [41].

Одна из таких первоочередных задач – количественно оценить влияние 3 фактора палеоклимата – позднечетвертичных ледниковых покровов – на расчетный геотермический режим и степень реализации генерационного потенциала баженовских отложений Западной Сибири. Эти периодически формирующиеся ледниковые покровы в центрах формирования на севере Западной Сибири достигали мощности 3500 м [3].

Благодарим д.г.-м.н. А.Н.Фомина, предоставившего данные OCB.

- Low geothermal heat flow of the Urals fold belt implication of low heat production, fluid circulation or palaeoclimate? / I.T. Kukkonen, I.V. Golovanova, Yu.V. Khachay, V.S. Druzhinin, A.M. Kosarev, V.A. Scharov // Tectonophysics. - 1997. -V. 276. - P. 63-85.
- Ерофеев Л.Я., Завидий Т.Ю. Определение поправки за палеоклиматический фактор для коррекции результатов геотермических исследований // Геофизика. – 2010. – № 5. – С. 48–52.
- Голованова И.В., Сальманова Р.Ю., Тагирова Ч.Д. Методика расчета глубинных температур с учетом исправленных на влияние палеоклимата значений теплового потока // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 9. – С. 1426–1435.
- Vertical variation in heat flow on the Kola Peninsula: palaeoclimate or fluid flow? / C. Vogt, D. Mottaghy, V. Rath, G. Marquart, L. Dijkshoorn, A. Wolf, C. Clauser // Geophysical Journal International. - 2014. - V. 199. - P. 829-843.
- Демежко Д.Ю., Горностаева А.А. Реконструкции долговременных изменений теплового потока через земную поверхность по данным геотермии глубоких скважин // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 12. – С. 1841–1846.
- Ермаков В.И., Скоробогатов В.А. Тепловое поле и нефтегазоносность молодых плит СССР. – М.: Недра, 1986. – 222 с.

- Нефтегазоносность центральной части Югорского свода / В.И. Исаев, Г.А. Лобова, М.Э. Рояк, А.Н. Фомин // Геофизический журнал. – 2009. – Т. 31. – № 2. – С. 15–46.
- Влияние палеоклимата на геотермический режим и нефтегенерационный потенциал баженовской свиты (на широтах Томской области) / Г.А. Лобова, Е.Н. Осипова, К.А. Криницина, Ю.Г. Останкова // Известия Томского политехнического университета. – 2013 – Т. 322. – № 1. – С. 45–50.
- Моделирование процессов генерации, миграции и аккумуляции углеводородов в юрских и меловых комплексах Енисей-Хатангского бассейна / П.И. Сафронов, С.В. Ершов, Н.С. Ким, А.Н. Фомин // Геология нефти и газа. – 2011. – № 5. – С. 48–55.
- Лопатин Н.В. Концепция нефтегазовых генерационно-аккумуляционных систем как интегрирующее начало в обосновании поисково-разведочных работ // Геоинформатика. – 2006. – № 3. – С. 101–120.
- Галушкин Ю.И., Ситар К.А., Куницина А.В. Численное моделирование преобразования органического вещества осадочных горных пород северо-восточного шельфа Сахалина // Океанология. – 2011. – Т. 51. – № 3. – С. 521–531.
- 16. Геотермия арктических морей / М.Д. Хуторской, В.Р. Ахмедзянов, А.В. Ермаков, Ю.Г. Леонов, Л.В. Подгорных, Б.Г. Поляк, Е.А. Сухих, Л.А. Цыбуля / отв. ред. Ю.Г. Леонов. – М.: ГЕОС, 2013. – 232 с.
- Галушкин Ю.И. Моделирование осадочных бассейнов и оценка их нефтегазоносности. – М.: Научный Мир, 2007. – 456 с.
- Гольберт А.В. Основы региональной палеоклиматологии. М: Недра, 1987. – 222 с.
- Лобова Г.А., Стоцкий В.В., Исаев В.И. Влияние палеоклимата на геотермический режим и реализацию нефтегенерационного потенциала баженовских отложений юго-востока Западной Сибири (Новосибирская область) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2014. – Т. 9. – № 3. URL: http://www. ngtp.ru/rub/4/31\_2014.pdf (дата обращения: 20.08.2015).
- 20. Исаев В.И., Искоркина А.А. Мезозойско-кайнозойский ход температур на поверхности Земли и геотермический режим юрских нефтематеринских отложений (южная палеоклиматическая зона Западной Сибири) // Геофизический журнал. – 2014. – Т. 36. – № 5. – С. 64–80.
- Исаев В.И., Лобова Г.А., Фомин А.Н. Влияние палеоклимата на геотермический режим баженовских отложений юго-востока Западной Сибири // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2015. – № 3. – С. 4–11.
- Исаев В.И., Рылова Т.Б., Гумерова (Искоркина) А.А. Палеоклимат Западной Сибири и реализация генерационного потенциала нефтематеринских отложений // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 93–102.
- Эльгер Ю.С. К вопросу о границах покровного четвертичного оледенения в пределах Западной Сибири и Казахстана // Разведка и охрана недр. – 2015. – № 1. – С. 30–33.
- Krasny M.L., Kosygin V.Yu., Isaev V.I. Density Model of the Seismic Acoustic Basement of the Kuril-Kamchatka Island System and Surrounding Areas // Modern Geology. - 1986. -V. 10 (1). - P. 65-72.
- Density Modeling of the Basement of Sedimentary Sequences and Prediction of Oil-Gas Accumulation: Evidence from South Sakhalin and West Siberia / V.I. Isaev, R.Yu. Gulenok, O.S. Isaeva, G.A. Lobova // Russian Journal of Pacific Geology. - 2008. -V. 2. - № 3. - P. 191-204.

- Isaev V.I. Interpretation of High-Accuracy Gravity Exploration Data by Mathematic Programming // Russian Journal of Pacific Geology. - 2013. - V. 7. - № 2. - P. 92-106.
- Модель катагенеза органического вещества (на примере баженовской свиты) / Л.М. Бурштейн, Л.В. Жидкова, А.Э. Конторович, В.Н. Меленевский // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. – № 6. – С. 1070–1078.
- Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность мезозойскокайнозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 253 с.
- Сурикова Е.С., Калинина Л.М. История тектонического развития Межовского мегамыса и модель геологического строения Верх-Тарского нефтяного месторождения. Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2010. Т. 5. № 1. URL: http://www.ngtp.ru/rub/4/14\_2010.pdf (дата обращения: 20.08.2015).
- Шарбатян А.А. Экстремальные оценки в геотермии и геокриологии. – М.: Наука, 1974. – 123 с.
- Isaev V.I., Volkova N.A., Nim T.V. Solution of direct invers sedimentation heat-flow problems // Geology of the Pacific Ocean. 1996. – V. 12. – № 3. – P. 523–536.
- 32. Estimation of the Oil-and-Gas Potential of Sedimentary Depression in the Far East and West Siberia Based on Gravimetry and Geothermy Data / R.Yu. Gulenok, V.I. Isaev, V.Yu. Kosygin, G.A. Lobova, V.I. Starostenko // Russian Journal of Pacific Geology. 2011. V. 5. № 4. P. 273-287.
- 33. Геотермия как метод разведочной геофизики (на примере оценки ресурсов углеводородов доюрского основания Западной Сибири) / Г.А. Лобова, А.К. Исагалиева, Е.М. Ахметов, В.И. Исаев // Известия НАН Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук. – 2015. – № 2. – С. 84–94.
- 34. Шкала геологического времени / У.Б. Харленд, А.В. Кокс, П.Г. Ллевеллин, К.А.Г. Пиктон, А.Г. Смит, Р. Уолтерс. – М.: Мир, 1985. – 140 с.
- 35. Компьютерная технология комплексной оценки нефтегазового потенциала осадочных бассейнов / В.И. Исаев, Р.Ю. Гуленок, О.В. Веселов, А.В. Бычков, Ю.Г. Соловейчик // Геология нефти и газа. – 2002. – № 6. – С. 48–54.
- Иванов Н.С., Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства мерзлых горных пород. – М.: Наука, 1965. – 74 с.
- 37. Isaev V.I., Fomin A.N. Loki of generation of bazhenov- and togurtype oils in the southern Nyurol'ka megadepression // Russian Geology and Geophysics. - 2006. - V. 47. - № 6. - P. 734-745.
- 38. Геология нефти и газа Западной Сибири / А.Э. Конторович, И.И. Нестеров, Ф.К. Салманов, В.С. Сурков, А.А. Трофимук, Ю.Г. Эрвье. – М.: Недра, 1975. – 680 с.
- Лобова Г.А., Попов С.А., Фомин А.Н. Локализация прогнозных ресурсов нефти юрско-меловых НГК Усть-Тымской мегавпадины // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 2. – С. 36–40.
- 40. Isaev V.I., Lobova G.A., Osipova E.N. The oil and gas contents of the Lower Jurassic and Achimovka reservoirs of the Nyurol'ka megadepression // Russian Geology and Geophysics. – 2014. – V. 55. – P. 1418–1428.
- 41. Разработка эффективной методики оценки ресурсов углеводородов с применением сравнительно-исторического метода и геотермии как нового метода разведочной геофизики / А.А Искоркина, И.В. Брылина, А.А. Корниенко, В.И. Исаев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 7. С. 60–69.

UDC 553.98:553.041:552.578:550.8.05

## LATE QUATERNARY PERMAFROST AS A FACTOR OF GEOTHERMAL MODE AND REALIZATION OF PETROGENERATIVE CAPACITY OF THE BAZHENOV SUITE (TOMSK AND NOVOSIBIRSK REGIONS)

#### Albina A. Iskorkina,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: iskorkina.a@mail.ru.

#### Aigul K. Issagalieva,

Kazakh National Technical University named after K.I. Satpayev, 22, Satpayev street, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan. E-mail: a isagalieva@mail.ru

#### Olga S. Isaeva,

Territorial fund of geological information for the Siberian Federal District, bld. 16, 9, Mokrushin street, Tomsk, 634034, Russia. E-mail: isaeva\_sah@mail.ru

#### Vladimir Yu. Kosygin,

Computer center of DVO Russian Academy of Sciences, 65, Kym Yu Chen street, Khabarovsk, 680000, Russia. E-mail: kosyginv@inbox.ru

#### Valeriy I. Isaev,

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

**The relevance of the research** is caused by the need to develop the criteria and effective schemes of quantitative assessment of resources – prospects of petroleum of West Siberian petroleum province territories having unique late quaternary paleoclimate features. In the review of the problem of improving the technique to calculate the resources of hydrocarbons by the volume and genetic method the authors have determined the major paleoclimate factors: 1) the century course of temperatures on a terrestrial surface; 2) formation and degradation of Neo-Pleistocene thickness of permafrost rock; 3) late quaternary glacial covers.

**The main aim** of the research is to define the influence of the second factor of a paleoclimate – Neo-Pleistocene permafrost thickness – on the settlement geothermal regime and extent of implementation of their generative potential of petromaternal deposits on the example of the Bazhenov suite of the southeast of Western Siberia.

**Object of researches** is Bazhenov deposits of the Mesozoic and Cenozoic section, opened with deep wells in the southeast of Western Siberia (the Luginetskaya field of the Tomsk region, the Verkh-Tarsky field of the Novosibirsk region).

**The technique of researches** is based on a method of paleotemperature modeling – the solution of the return and direct problems of a non-stationary geothermal in the conditions of sedimentation, on diversity paleotectonic and paleotemperature reconstructions, on the assessment of the reconstruction results compliance to the criteria of optimality of geophysics return problem solution, on the assessment of coherence degree of the settlement centers of oil generation with the established petroleum potential of mineral resources.

**Research results.** It was ascertained that the accounting of Neo-Pleistocene permafrost with about 300 m power is necessary and it is preferable to apply the «local» (regional) century course of temperatures on a terrestrial surface to adequate recovery of thermal history of petromaternal deposits on epy lands of the southeast of Western Siberia. This allows considering more correctly the history of the main phase of oil formation, both without underestimating (to 25-30 %) the settlement of hydrocarbon resources obtained by the volume and genetic method. The conclusion is drawn that the interdisciplinary approach (petroleum geology, geophysics and a paleoclimatology) can provide the development of the resource efficient technology of searching and investigating hydrocarbons.

#### Key words:

Resources of hydrocarbon, Neo-Pleistocene permafrost, Bazhenov deposits, paleotemperature modeling, southeast of Western Siberia.

The authors thank Dr. Sc. A.N. Fomin for vitrinite reflectance data.

#### REFERENCES

- 1. Vassoevich N.B. Teoriya osadochno migracionnogo proiskhozhdeniya nefti (istoricheskiy obzor i sovremennoe sostoyanie) [Theory of a sedimentary and migratory origin of oil (historical review and current state)]. *Izvestiya AN SSSR. Ser. Geol* – *Bulletin of the AN SSSR. Ser. Geol.*, 1967, no. 11, pp. 135–156.
- Kontorovich A.E., Parparova G.M., Trushkov P.A. Metamorfizm organicheskogo veshchestva i nekotorye voprosy neftegazonosnosti (na primere mezozoiskikh otlozheniy Zapadno Sibirskoy nizmennosti) [Metamorphism of organic substance and some issues of petroleum content (on the example of Mesozoic deposits of the West Siberian lowland)]. Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics, 1967, no. 2, pp. 16–29.
- Kontorovich A.E., Burshteyn L.M., Malyshev N.A., Safronov P.I., Guskov S.A., Ershov S.V., Kazanenkov V.A., Kim N.S., Kontorovich V.A., Kostyreva E.A., Melenevskiy V.N., Livshits V.R., Polyakov A.A., Skvortsov M.B. Istoriko-geologicheskoe modelirovanie protsessov naftidogeneza v mezozoyskokaynozoyskom osadochnom basseyne Karskogo morya (basseynovoe modelirovanie) [Historical and geological modeling of naftidogenesis processes in Mesozoic-Cenozoic sedimentary basin of the Kara Sea (basin modeling)]. Geologiya i Geofizika – Russian Geology and Geophysics, 2013, vol. 54, no. 8, pp. 1179–1226.
- Prishchepa O.M. Kompleksny sposob kolichestvennoy otsenki resursov nefti i gaza v zonakh neftegazonakopleniya [A complex way of a quantitative assessment of oil and gas resources in oil

and gas accumulation zones]. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya i Praktika – Oil and gas geology. Theory and practice*, 2011, vol. 6, no. 4. Available at: http://www.ngtp.ru/rub/6/44\_2011.pdf (accessed: 20 August 2015).

- Kukkonen I.T., Golovanova I.V., Khachay Yu.V., Druzhinin V.S., Kosarev A.M., Scharov V.A. Low geothermal heat flow of the Urals fold belt – implication of low heat production, fluid circulation or palaeoclimate? *Tectonophysics*, 1997, vol. 276, pp. 63–85.
- Erofeev L.Ya., Zavidiy T.Yu. Opredelenie popravki za paleoklimaticheskiy faktor dlya korrektsii rezultatov geotermicheskikh issledovaniy [Definition of the amendment for a paleoclimate factor for correcting the results of geothermal researches]. *Geofizika – Geophysics*, 2010, no. 5, pp. 48–52.
- Golovanova I.V., Salmanova R.Yu., Tagirova Ch.D. Metodika rascheta glubinnykh temperatur s uchetom ispravlennykh na vliyanie paleoklimata znacheniy teplovogo potoka [Method for deeptemperature estimation with regard to the paleoclimate influence on the heat flow]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 9, pp. 1426–1435.
- Vogt C., Mottaghy D., Rath V., Marquart G., Dijkshoorn L., Wolf A., Clauser C. Vertical variation in heat flow on the Kola Peninsula: palaeoclimate or fluid flow? *Geophysical Journal In*ternational, 2014, vol. 199, pp. 829–843.
- Demeyko D.Yu., Gornostaeva A.A. Rekonstruktsii dolgovremennykh izmeneniy teplovogo potoka cherez zemnuyu poverkhnost po dannym geotermii glubokikh skvazhin [Reconstruction of long-term changes of a thermal stream through a terrestrial surface according to a geothermics of deep wells]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 12, pp. 1841–1846.
- Ermakov V.I., Skorobogatov V.A. Teplovoe pole i neftegazonosnost molodykh plit SSSR [Thermal field and oil and gas content of young plates of the USSR]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 222 p.
- Isaev V.I., Lobova G.A., Royak M.E., Fomin A.N. Neftegazonosnost tsentralnoy chasti Yugorskogo svoda [Oil and gas content of the central part of the Yugra arch]. *Geofizicheskiy zhurnal – Geophysical journal*, 2009, vol. 31, no. 2, pp. 15–46.
- 12. Lobova G.A., Osipova E.N., Krinitsyna K.A., Ostankova Yu.G. Vliyanie paleoklimata na geotermicheskiy rezhim i neftegeneratsionny potentsial bazhenovskoy svity (na shirotakh Tomskoy oblasti) [Influence of paleoclimate on geothermal regime and oil generation potential of the Bazhenov Formation (at latitudes of Tomsk region)]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2013, vol. 322, no. 1, pp. 45–50.
- 13. Safronov P.I., Ershov S.V., Kim N.S., Fomin A.N. Modelirovanie protsessov generatsii, migratsii i akkumulyatsii uglevodorodov v yurskikh i melovykh kompleksakh Enisey-Khatangskogo basseyna [Modeling generation, migration and accumulation of hydrocarbons in the Jurassic and cretaceous complexes of the Yenisei-Hatangsky basin]. *Geologija nefti i gaza – Geology of oil and gas*, 2011, no. 5, pp. 48–55.
- 14. Lopatin N.V. Kontseptsiya neftegazovykh generatsionno-akkumulyatsionnykh sistem kak integriruyushchee nachalo v obosnovanii poiskovo-razvedochnykh rabot [The concept of oil and gas generative and accumulative systems as the integrating beginning in justification of exploration]. *Geoinformatika*, 2006, no. 3, pp. 101–120.
- Galushkin Yu.I., Sitar K.A., Kunitsyna A.V. Chislennoe modelirovanie preobrazovaniya organicheskogo veshchestva osadochnykh gornykh porod severo-vostochnogo shelfa sakhalina [Numerical modeling of organic substance transformation in sedimentary rocks of the northeast shelf of Sakhalin]. Oceanology, 2011, vol. 51, no. 3, pp. 521–531.
- Hutorskoy M.D., Akhmedzyanov V.R., Ermakov A.V., Leonov Yu.G., Podgornykh L.V., Polyak B.G., Sukhikh E.A., Tsybulya L.A. *Geotermiya arkticheskikh morey* [Geothermic of the Ar-

ctic seas]. Ed. by Yu.G. Leonov. Moscow, GEOS Publ., 2013. 232 p.

- Galushkin Yu.I. Modelirovanie osadochnykh basseynov i otsenka ikh neftegazonosnosti [Modeling of decantation basins and assessment of their oil-and-gas content]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2007. 456 p.
- Golbert A.V. Osnovy regionalnoy paleoklimatologii [Bases of regional paleoclimatology]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 222 p.
- Lobova G.A., Stotskiy V.V., Isaev V.I. Vliyanie paleoklimata na geotermicheskiy rezhim i realizatsiyu neftegeneratsionnogo potentsiala bazhenovskikh otlozheniy yugo-vostoka Zapadnoy Sibiri (Novosibirskaya oblast) [Influence of paleoclimate on geothermal mode and realization of petrogenerative potential of Bazhenov deposits in the southeast of Western Siberia (Novosibirsk region)]. Neftegazovaya Geologiya. Teoriya iI Praktika – Oil and gas geology. Theory and practice, 2014, vol. 9, no. 3. Available at: http://www.ngtp.ru/rub/4/31\_2014.pdf (accessed: 20 August 2015).
- 20. Isaev V.I., Iskorkina A.A. Mezozoysko-kaynozoyskiy hod temperatur na poverkhnosti Zemli i geotermicheskiy rezhim yurskikh neftematerinskikh otlozheniy (yuzhnaya paleoklimaticheskaya zona Zapadnoy Sibiri) [Mesozoic and Cainozoic course of temperatures on the Earth surfaces and geothermal mode of the Jurassic petromaternal deposits (the southern paleoclimate zone of Western Siberia)]. Geofizicheskiy zhurnal Geophysical journal, 2014, vol. 36, no. 5, pp. 64–80.
- Isaev V.I., Lobova G.A., Fomin A.N. Vliyanie paleoklimata na geotermicheskiy rezhim bazhenovskikh otlozheniy yugo-vostoka Zapadnoy Sibiri [Influence of paleoclimate on geothermal mode of bazhenov deposits in the southeast of Western Siberia]. *Geology,* geophysics and development of oil and gas fields, 2015, no. 3, pp. 4–11.
- 22. Isaev V.I., Rylova T.B., Gumerova (Iskorkina) A.A. Paleoklimat Zapadnoy Sibiri i realizatsiya generatsionnogo potentsiala neftematerinskikh otlozheniy [Paleoclimate of Western Siberia and realization of generative potential of petromaternal deposits]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2014, vol. 324, no. 1, pp. 93–102.
- Elger Yu.S. K voprosu o granitsakh pokrovnogo chetvertichnogo oledeneniya v predelakh Zapadnoy Sibiri i Kazakhstana [Borders of integumentary quarternary freezing within Western Siberia and Kazakhstan]. Razvedka i okhrana nedr – Investigation and protection of a subsoil, 2015, no. 1, pp. 30–33.
- Krasny M.L., Kosygin V.Yu., Isaev V.I. Density Model of the Seismic Acoustic Basement of the Kuril-Kamchatka Island System and Surrounding Areas. *Modern Geology*, 1986, vol. 10 (1), pp. 65–72.
- Isaev V.I., Gulenok R.Yu., Isaeva O.S., Lobova G.A. Density Modeling of the Basement of Sedimentary Sequences and Prediction of Oil-Gas Accumulation: Evidence from South Sakhalin and West Siberia. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2008, vol. 2, no. 3, pp. 191-204.
- Isaev V.I. Interpretation of High-Accuracy Gravity Exploration Data by Mathematic Programming. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2013, vol. 7, no. 2, pp. 92–106.
- 27. Burshteyn L.M., Zhidkova L.V., Kontorovich A.E., Melenevskiy V.N. Model katageneza organicheskogo veshchestva (na primere bazhenovskoy svity) [The katagenesis model of organic matter (by the example of Bazhenov Formation)]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 1997, vol. 38, no. 6, pp. 1070–1078.
- Kontorovich V.A. Tektonika i neftegazonosnost mezozoysko-kaynozoyskikh otlozheniy yugo-vostochnykh rayonov Zapadnoy Sibiri [Tectonics and oil-and-gas petroleum potential of the Mesozoic-Cenozoic deposits in southeastern regions of West Siberia]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2002. 253 p.
- 29. Surikova E.S., Kalinina L.M. Istoriya tektonicheskogo razvitiya Meyovskogo megamysa i model geologicheskogo stroeniya Verkh-

Tarskogo neftyanogo mestorozhdeniya [History of tectonic development of the Mezhovsky mega-foreland and model of geological structure of the Verkh-Tarsky oil field]. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya i Praktika – Oil and gas geology. Theory and practice*, 2010, vol. 5, no. 1. Available at: http://www.ngtp.ru/rub/4/14\_2010.pdf (accessed: 20 August 2015).

- Sharbatyan F.F. Ekstremalnye otsenki v geotermii i geokriologii [Extreme estimates in the geothermic and cryopedology]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 123 p.
- Isaev V.I., Volkova N.A., Nim T.V. Solution of direct invers sedimentation heat-flow problems. *Geology of the Pacific Ocean*, 1996, vol. 12, no. 3, pp. 523-536.
- 32. Gulenok R.Yu., Isaev V.I., Kosygin V.Yu., Lobova G.A., Starostenko V.I. Estimation of the Oil-and-Gas Potential of Sedimentary Depression in the Far East and West Siberia Based on Gravimetry and Geothermy Data. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2011, vol. 5, no. 4, pp. 273–287.
- 33. Lobova G.A., Isagalieva A.K., Akhmetov E.M., Isaev V.I. Geotermiya kak metod razvedochnoy geofiziki (na primere otsenki resursov uglevodorodov doyurskogo osnovaniya Zapadnoy Sibiri) [Geothermics as a method of prospecting geophysics (on the example of assessment of hydrocarbons resource of the pre-Jurassic basis in Western Siberia)]. Izvestiya NAN Respubliki Kazakhstan. Seriya geologii i tekhnicheskikh nauk – News of NAN of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical science, 2015, no. 2, pp. 84–94.
- Harlend U.B., Koks A.V., Llevellin P.G., Pikton K.A.G., Smit A.G., Uolters R. Shkala geologicheskogo vremeni [Shkal geological time]. Moscow, Mir Publ., 1985. 140 p.
- 35. Isaev V.I., Gulenok R.Yu., Veselov O.V., Bychkov A.V., Soloveychik Yu.G. Kompyuternaya tekhnologiya kompleksnoy otsenki neftegazovogo potentsiala osadochnykh basseynov [Computer technology of a complex assessment of oil and gas potential of de-

cantation basins]. Geologiya nefti i gaza – Geology of oil and gas, 2002, no. 6, pp. 48–54.

- Ivanov N.S., Gavrilev R.I. Teplofizicheskie svoystva merzlykh gornykh porod [Thermal physical properties of frozen rocks]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 74 p.
- Isaev V.I., Fomin A.N. Loki of generation of bazhenov- and togurtype oils in the southern Nyurol'ka megadepression. *Russian Ge*ology and Geophysics, 2006, vol. 47, no. 6, pp. 734–745.
- Kontorovich A.E., Nesterov I.I., Salmanov F.K., Surkov V.S., Trofimuk A.A., Erve Yu.G. *Geologiya nefti i gaza Zapadnoy Sibiri* [Geology of oil and gas of Western Siberia]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 680 p.
- Lobova G.A., Popov S.A., Fomin A.N. Lokalizatsiya prognoznykh resursov nefti yursko-melovykh neftegazonosnykh kompleksov Ust-Tymskoy megavpadiny [Localization of probable oil resource for Jurassic and Cretaceous oil-and-gas complexes of the Ust-Tym megadepression]. Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry, 2013, no. 2, pp. 36–40.
- Isaev V.I., Lobova G.A., Osipova E.N. The oil and gas contents of the Lower Jurassic and Achimovka reservoirs of the Nyurol'ka megadepression. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, pp. 1418–1428.
- 41. Iskorkina A.A., Brylina I.V., Kornienko A.A., Isaev V.I. Razrabotka effektivnoy metodiki otsenki resursov uglevodorodov s primeneniem sravnitelno-istoricheskogo metoda i geotermii kak novogo metoda razvedochnoy geofiziki [Development of an effective technique for assessing hydrocarbon resources applying the comparative-historical method and geothermic as a new method of prospecting geophysics]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2015, vol. 326, no. 7, pp. 60–69.

Received: 26 August 2015.

#### УДК 697.133

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И ГРУНТА ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ КОММУНИКАЦИЙ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ Г. ЯКУТСКА

#### Анисимов Максим Васильевич,

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

#### Рекунов Виталий Сергеевич,

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

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью обеспечения эффективной тепловой защиты инженерных коммуникаций при их подземной прокладке в зоне вечномерзлых грунтов.

**Цель работы:** прогнозирование с использованием разработанного программного комплекса температурных полей в ограждающих конструкциях проектируемых зданий, грунте под зданием и вблизи его в климатических условия г. Якутска; разработка рекомендаций по эффективному утеплению инженерных сетей, прокладываемых подземно.

Методы исследования. Предложена физико-математическая модель теплового состояния проветриваемого техподполья зданий с учетом воздухообмена и конструктивных особенностей строительства в условиях вечномерзлых грунтов; численное решение поставленной задачи с использованием разработанного программного комплекса; проведение натурных исследований. Результаты. Разработана расчетная схема прогнозирования температурных полей в ограждающих конструкциях проектируемых зданий, в грунте под зданием и вблизи его в климатических условиях г. Якутска. Проведено численное моделирование изменения температурных полей основных ограждающих конструкций зданий и грунте в течение года. Сравнительный анализ полученных результатов с эмпирическими показал их удовлетворительную согласованность. Осуществлен подбор эффективной толщины утепляющего слоя инженерных коммуникаций в условиях их подземной прокладки в зоне вечномерзлых грунтов. В результате проделанной работы была рассмотрена двумерная нестационарная симметричная задача теплопроводности в полуограниченном массиве с совокупностью граничных условий. Была предложена физико-математическая модель теплообмена техподполья здания с учетом влияния воздухообмена и снегового покрова снаружи здания. Была проведена серия натурных экспериментов в климатических условиях г. Якутска по определению типов грунта, находящихся в зоне строительства. Результаты численного моделирования показали, что теплота, поступающая через перекрытие над техподпольем и через стены, практически не влияет на температурное поле грунтов как под зданием, так и на расстоянии от него. В соответствии с проведенными исследованиями, температуры в массиве грунтов за пределами зоны строительства принимаются равными их естественным значениям. Сравнение результатов численного решения с решением, полученным из других теплотехнических компьютерных программ (например, Temper-3D), показало их удовлетворительную согласованность. Тем не менее, программа Temper-3D не учитывает воздухообмен в техподполье, который играет существенную роль при формировании температурных полей в ограждающих конструкциях и грунте.

#### Ключевые слова:

Воздухообмен, вечномерзлые грунты, ограждающие конструкции, температурные поля, проветриваемое техподполье.

#### Анализ проблемы

Прогнозирование температурных полей в грунтах и строительных конструкциях, примыкающих к ним, – является сложной теплотехнической задачей. Это объясняется неоднородностью типов грунтов, их теплотехническими свойствами, а также наличием «фазовых переходов» при их промерзании. Особого внимания заслуживают вечномерзлые грунты, в которых в течение года наблюдаются сложные комплексные тепловые процессы «замерзания–оттаивания», формирование поверхностного слоя грунта, имеющего положительную температуру в теплый период года, талого грунта, имеющего относительные постоянные температуры в течение года, и слоя грунта, находящегося в вечномерзлом состоянии.

Зачастую при проектировании и строительстве зданий необходимо определять температурное по-

ле грунтов вблизи здания, где имеется его тепловое влияние. Эта задача становится особо актуальной в случае проектирования утепления подземного ввода сети водопровода в здание и выпуска канализации при сложном рельефе местности в зоне застройки, когда перепады отметок поверхности грунта сильно колеблются. Знание температурного поля в зоне теплового влияния здания, а также вне его позволило бы сделать правильный прогноз по остыванию воды в трубах (в том числе с учетом экстремально низких температур зимой) и рекомендовать необходимые меры по утеплению трубопроводов.

Прокладка инженерных коммуникаций в таких климатических условиях, как например в г. Якутске (Республики Саха) требует особого инженерного подхода. В соответствии с [1], температура воздуха наиболее холодной пятидневки для г. Якутска составляет минус 52 °С (минимально наблюдаемая температура воздуха минус 64 °С).

Подземная прокладка инженерных коммуникаций в условиях особо низких температур должна выполняться с учетом того, что не только температура вечномерзлых грунтов может влиять на температуру сред, проходящих через трубопроводы, и может вызвать их перемерзание, но и инженерные коммуникации могут вызвать повышение температуры таких грунтов. Последствия изменения естественной температуры вечномерзлых грунтов могут быть непредсказуемы. Переход из плотного мерзлого состояния в талое таких грунтов может повлечь за собой потерю несущих свойств свай фундаментов зданий, что может привести к невозможности эксплуатации строящегося здания.

Несмотря на то, что прокладку теплосетей, сетей горячего и холодного водоснабжения в климатических условиях г. Якутска принято выполнять надземно на несущих опорах с их последующим утеплением, трубопроводы канализации, как правило, монтируют в подземном исполнении. Такое решение обусловлено санитарно-эпидемиологическими требованиями, а также требованиями эстетики. Бытовые стоки в системах канализации зданий имеют температуру не ниже 18-25 °С и потенциально могут влиять на естественные температурные поля прилегающих грунтов. Во избежание теплового влияния, трубопроводы канализации прокладываются выше отметки вечномерзлых грунтов и подлежат утеплению, чтобы обеспечить им защиту от промерзания. Определение эффективной толщины утепляющего слоя таких инженерных систем, с учетом нестационарного теплопереноса в грунтах, позволило бы не только решить сложную теплотехническую задачу, но и обеспечило бы ресурсосбережение при строительстве капитальных зданий и сооружений в климатических условиях г. Якутска Республики Саха.

#### Анализ особенностей прокладки инженерных систем в климатических условиях г. Якутска

Для разработки мероприятий по определению эффективной толщины утепляющего слоя для системы канализации здания в г. Якутске было выбрано каркасное общественное здание.

Холодное техподполье является закрытым и используется для прокладки некоторых инженерных коммуникаций, включая канализационные трубы. Магистральные трубопроводы канализации в здании прокладываются в техподполье под потолком с закрепелнием их подвесами. Трубопроводы оборачиваются «греющим» кабелем и дополнительно утепляются. В месте выпуска канализации из здания трубопроводы заглубляются в грунт на необходимую отметку и до канализационной насосной станции прокладываются подземно.

На месте строительной площадки был проведен анализ мерзлото-грунтовых условий. В результате анализа было выявлено, что в геологическом отношении участок сложен четвертичными аллювиальными отложениями, представленными супесями, суглинками, песками пылеватыми и мелкими. С поверхности отложения перекрыты почвеннорастительным слоем мощностью до 0,2 м.

Мерзлотные условия площадки строительства характеризуются сплошным распространением многолетнемерзлых грунтов со сливающимся слоем сезонного оттаивания. В период производства буровых работ (ноябрь-декабрь 2012 г.) мерзлые грунты вскрыты до глубины 0,9 м, ниже грунты в талом состоянии до глубины 3,3 м, ниже до исследованной глубины 10,0–15,0 м находились в мерзлом состоянии. Криогенная текстура мерзлых супесей, суглинков, песков массивная.

Температурный режим грунтов основания характеризуется распространением высоких значений отрицательных температур, составляющих на глубине 10,0 м от -0,63 до -1,62 °C. При этом высокие значения температур в диапазоне от -0,63 до -0,87 °C установлены в скважинах, пройденных вблизи озера, что, видимо, объясняется влиянием подозерного непромерзающего талика, граница которого в виде «языка» в глубине распространяется к северу от уреза воды озера. Само озеро до сравнительно недавнего времени (<100 лет) являлось частью старичного озера, проточного в период паводковых вод. По данным лабораторных исследований засоленность грунтов участка имеет не повсеместный характер распространения.

Для сохранения грунтов в мерзлом состоянии и соблюдения их расчетного теплового режима в проекте было рекомендовано устройство круглогодично проветриваемого подполья, высота и вентиляционный режим которого определяются теплотехническим расчетом.

Анализ грунтов в зоне застройки проводился бурением скважин с последующим замером температуры на различных глубинах и исследованием типов грунтов.

В таблице представлена сводная ведомость температурных замеров грунтов в зоне застройки.

Как показало обследование грунтов, наилучший глубиной для прокладки инженерных коммуникаций является глубина от  $\approx 0,6-0,8$  до  $\approx 2,2$  м от уровня почвенно-растительного слоя. Выше данной глубины грунт в период отрицательных температур существенно промерзает, а глубже указанных отметок начинается уже слой вечномерзлых пород.

# Обзор существующих методов расчета теплопереноса в грунтах

При проведении обзора теории расчета теплопереноса в грунтах следует отметить вклад таких авторов, как А.В. Богословский, А.Г. Гиндоян, А.А. Сандер, Л.А. Иооритис, Г.В. Порхаев и др. Особо хочется отметить работы такого ученого, как Г.В. Порхаев, который в своей работе [2] исследовал тепловое взаимодействие зданий и сооружений с вечномерзлыми грунтами. Как показали исследования Г.В. Порхаева, на застраиваемой территории

	, ,										
№ скважин	Дата замеров				Гл	убина, м	ı/Depth,	m			
Well	Sampling date	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
1		-0,39	-0,26	-0,35	-0,72	-0,67	-0,57	-0,74	-0,83	-0,72	-0,63
2	27.11.12	-0,35	-0,25	-0,76	-1,29	-1,33	-1,39	-1,52	-1,73	-1,61	-1,51
3	T T	-0,42	-0,37	-0,61	-0,83	-1,00	-1,09	-1,17	-1,10	-1,14	-1,16
4	14.11.12	-0,41	-0,27	-0,57	-0,83	-0,70	-0,69	-0,77	-0,96	-0,82	-0,87
5	20 11 12	-0,30	-0,63	-0,98	-1,42	-1,33	-1,37	-1,40	-1,71	-1,61	-1,62
6	29.11.12	-0,30	-0,26	-0,55	-1,56	-0,63	-1,02	-1,00	-1,06	-1,15	-1,30
7	20 12 12	-0,41	-0,24	-0,67	-1,10	-1,05	-1,12	-1,20	-1,46	-1,35	-1,17
8	20.12.12	-0,36	-0,25	-0,58	-0,66	-0,81	-0,88	-0,96	-1,02	-1,24	-1,31
9		-0,68	-0,23	-0,81	-1,37	-1,55	-1,71	-1,92	-2,16	-2,11	-2,21
10	17.12.12	-0,21	-0,23	-0,62	-0,78	-0,98	-1,16	-1,27	-1,35	-1,46	-1,72
11		-0,76	-0,92	-1,40	-1,61	-1,72	-1,94	-1,85	-1,88	-2,00	-2,06
12		-0,76	-0,22	-0,65	-1,24	-1,26	-1,28	-1,47	-1,68	-1,66	-1,53
13	21.12.12	-0,26	-0,25	-0,56	-0,68	-0,81	-1,00	-1,09	-1,23	-1,49	-1,64
14		-0,35	-0,42	-1,38	-1,59	-1,71	-1,92	-1,83	-1,91	-2,08	-1,96

 Таблица.
 Сводная ведомость температурных замеров грунтов в зоне застройки

 Table.
 Summary list of ground temperature measurements in development zone

температура грунта несколько отличается от температуры грунта, свободной от инженерных сооружений. Этот процесс возникает в результате теплопередачи от источников тепловыделений к грунту в подвальных или заглубленных помещениях.

Передача тепла из помещения через грунт является сложным процессом, сопровождаемым фазовым переходом влаги, наличием областей с талыми и мерзлыми грунтами. Под зданием, в грунте, формируется трехмерное температурное поле. Вблизи наружных стен поверхность пола имеет более низкую температуру, что приводит к увеличению теплопотерь.

Из современных авторов стоит отметить работы таких специалистов, как Д.А. Крылов [3–5], П.И. Дячек [6], Ю.С. Мельникова и др. [7]. Методы расчета тепловых полей в грунтах математическим моделированием также рассмотрены в работах А.А. Синицина [8] и Н.И. Сидняева [9]. Заслуживают внимания работы иностранных специалистов в данной области: Lunardini J. Virgil [10], E.K. Ebenezer [11], Ming Zhu, Radoslaw L. Michalowski [12] и др. [13]. Также немалый вклад в развитие строительной теплофизики внесли Aziz Belmiloudi [14], Theodore Louis [15], Donatello Annaratone [16] и др. [17, 18].

В этих работах основное внимание уделено исследованию теплопотерь при стационарном и квазистационарном режиме теплопередачи в зависимости от перепада температур между наружным и внутренним воздухом, коэффициента теплопроводности массива грунта, конструктивной схемы сопряжения здания с грунтом оснований.

Изменение температурных полей в многослойных ограждающих конструкциях с учетом различия коэффициентов теплопроводности грунта и материала фундаментов было исследовано В.С. Лукьяновым и А.А. Сандером. При этом было установлено, что это различие незначительно и при инженерных расчетах им можно пренебречь. Предлагаемые методы расчетов, как правило, ориентированы на вычисление температурных полей в грунтах, расположенных в основании зданий, т. е. в подвальных помещениях, и требуют большого количества вычислений как в стационарном, так и в нестационарном режиме теплопереноса. Но в случае, когда здание не имеет подвальных этажей и располагается на несущих сваях (с проветриваемым техподпольем), влияние воздухообмена на температурный режим прилегающих грунтов здания приобретает особую значимость. Это может в некоторых случаях затруднить их использование.

Кроме того, на сегодняшний день широкое распространение получили различные коммерческие программные комплексы, которые позволяют решать разнообразные тепловые задачи. Например, такой программный комплекс, как Temper-3D [19], который позволяет проводить расчеты температурных полей в ограждающих конструкциях, граничащих с грунтом.

В итоге можно сделать вывод, что имеющиеся на сегодняшний день методики теплового расчета теплопереноса через техподполья зданий либо недостаточно «гибки» и не позволяют учитывать изменение некоторых параметров, в связи с изменениями конструктива здания, либо разработаны для решения «узких» задач. При этом попытка привязать их к отличающимся условиям может повлечь за собой возникновение ошибок при расчете.

#### Математическое моделирование теплового состояния техподполья здания с учетом его воздухообмена

В общем случае задача расчета теплопотерь через многослойные ограждающие конструкции и грунт подвального помещения (в частности техподполья) является трехмерной. Однако, как правило, длина зданий различного назначения (в частности общественные здания) существенно превосходит их ширину, поэтому при разработке математической модели теплообмена подвального помещения в нестационарном режиме рассматривается двумерная нестационарная симметричная задача теплопроводности в полуограниченном массиве с совокупностью граничных условий. При этом внутренняя зона подвального помещения L отделена от внешней участком стен толщиной  $\delta$ , м (рис. 1).

Схемы физической и математической модели с указанными граничными условиями (ГУ) показаны на рис. 1.





Рис. 1. Расчетная схема математической модели: а) физическая модель подвального помещения; б) математическая модель подвального помещения; 1 – воздух внутри подвального помещения; 2 – утеплитель; 3 – наружная стена (железобетон); 4 – наружный слой гидроизоляции; 5, 8 – грунт; 6 – снежный покров; 7 – воздух снаружи подвального помещения; ГУ I, ГУ II, ГУ III, ГУ IV – граничные условия

**Fig. 1.** Structural model of mathematical model: a) physical model of underground accommodation; b) mathematical model underground accommodation. 1 is the air inside the underground accommodation; 2 is the insulation; 3 is the outside wall (ferroconcrete); 4 is the outer layer of waterproofing; 5, 8 is the soil; 6 is the snow cover; 7 is the air outside the underground accommodation; ΓΥ Ι, ΓΥ ΙΙ, ΓΥ III, ΓΥ IV are the boundary conditions

Для построения математической модели теплообмена подвального помещения в нестационарном режиме предлагается физическая модель, в которую входят различные среды (воздух, грунт, снег) и материалы (материал наружной стены, перекрытия, утеплителя) [20]. Каждая среда или материал, имеющий отличные от других теплофизические свойства, выделен в самостоятельный материальный слой: 1 - внутренний воздух, 2 - слой утеплителя, 3 – наружная стена, 4 – внешний слой покрытия стены, 5 – грунт снаружи подвального помещения, 6 - снежный покров, 7 - воздух, снаружи подвального помещения, 8 - грунт внутри подвального помещения, 9 – переменный слой снега над отмосткой. Слой 9 был введен для того, чтобы имелась возможность рассчитывать тепловые потери подвальным помещением с учетом того, что снежный покров над отмосткой в период отрицательных температур в ряде случаев убирается, по условиям эксплуатации зданий. В этом случае на границах существующих материальных слоев принимаются соответствующие граничные условия, отвечающие физическим процессам теплопереноса, протекающим на соответствующих плоскостях.

Стоит отметить, что такая постановка задачи позволяет модели обеспечить достаточную «гибкость» при расчетах, т. к. она предоставляет возможность выполнять необходимые вычисления не только для подвальных помещений, но и для техподполий (таких, как показано на рис. 1). При этом достаточно принять, что слой «5» (рис. 1) имеет такие же теплофизические свойства, как и слой 6, т. е. прилегание грунта к наружной стене отсутствует.

#### Математическая постановка задачи

Теплоперенос в многослойных ограждающих конструкциях подвального помещения и в твердых средах, таких как грунт и снег, в общем случае описывается трехмерными нелинейными нестационарными уравнениями теплопроводности в декартовой системе координат (1)

$$\rho C_{\partial} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(x, y, z),$$
(1)

где  $T=T(\bar{x},\tau)$  – температура; C,  $\rho$  – теплоемкость и плотность;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности; Q(x,y,z) – мощность внутренних тепловых источников;  $\bar{x}$  – вектор, характеризующий положение точки в пространстве;  $\tau$  – время.

При построении математической модели были сделаны следующие допущения:

- теплофизические свойства материалов (ρ<sub>i</sub>, C<sub>pi</sub>, λ<sub>i</sub>) ограждающих конструкций, снега и воздуха приняты постоянными;
- теплофизические свойства грунта в слое 5 и 8 приняты постоянными постоянными, основы-

ваясь на результатах проведенных исследований, представленных в [2].

- теплота (Q<sub>or</sub>) от инженерных коммуникаций, теплота, идущая на нагрев инфильтруемого холодного воздуха через подвальные продухи (Q<sub>ин</sub>), и теплопоступления через перекрытие первого этажа (Q<sub>пер</sub>) считаются равномерно распределенными по объему подвального помещения;
- температура воздуха внутри помещения 1-го этажа считается равной нормируемой [21];
- в начальный момент времени τ=0 температура во всех слоях математической модели равна температуре слоя 7 (наружный воздух);
- коэффициент теплоотдачи на границе «снежный покров наружный воздух» рассчитывается в соответствии с рекомендациями [22] для климатических условий г. Якутска.

Уравнение (1) с надлежащими начальными и граничными условиями представляет задачу о распределении температуры в каждой точке рассматриваемой области для любого момента времени. При этом предполагается, что начальное распределение температуры в материале, температурный режим на его границах и мощность внутренних источников тепловыделения известны, задача симметрична относительно оси х, а в направлении нормальном плоскости х-у является полубесконечной, т. к. на этих границах тепловые потоки ничтожны и ими пренебрегают [23], что позволяет ограничиться решением задачи в двумерной постановке (рис. 1).

С учетом сделанных допущений уравнение (1) примет вид

$$\rho \tilde{N}_{\delta} \frac{\partial \dot{O}}{\partial \tau} = \lambda \left( \frac{\partial^2 \dot{O}}{\partial \tilde{\sigma}^2} + \frac{\partial^2 \dot{O}}{\partial \delta^2} \right) + Q, \qquad (2)$$

где  $C_p$  – удельная изобарная теплоемкость;  $\rho$  – плотность материала;  $\lambda$  – теплопроводность материала; T – температура материала;  $\tau$  – время; Q – внутренние источники тепловыделений (данная составляющая учитывается только для слоя 1, рис. 1); x, y – координаты по горизонтали и вертикали.

Распределение тепловых потоков на поверхностях различных материальных слоев, представленных на рис. 1, находится из решения уравнения (2) с совокупностью граничных условий.

Граничные условия (3) для слоя 1 (воздух внутри техподполья):

$$\begin{aligned} \Pi \mathbf{p}\mathbf{u} \ \tilde{o} &= 0; \ y_{n0} \leq y \leq y_{n}; q = 0; \\ \Pi \mathbf{p}\mathbf{u} \ \tilde{o} &= x_{n0}; \ y_{n0} \leq y \leq y_{n}; \alpha_{B1}(T_{B} - T_{x_{n0}}) = -\lambda \frac{\partial T_{2}}{\partial x}; \\ \Pi \mathbf{p}\mathbf{u} \ x_{0} \leq \tilde{o} \leq x_{n0}; \ y &= y_{n}; q = f(\tau, T_{B}); \\ \Pi \mathbf{p}\mathbf{u} \ x_{0} \leq \tilde{o} \leq x_{n0}; \ y &= y_{n0}; \\ \alpha_{B2}(T_{B} - T_{y_{0}}) &= -\lambda_{8} \frac{\partial T_{8}}{\partial y}, \ \lambda_{8} = \text{const}, \end{aligned}$$
(3)

где  $\alpha_{B1}$ ,  $\alpha_{B2}$  – коэффициент теплоотдачи вблизи цокольной стены и в пригрунтовой зоне соответственно,  $BT/(m^2 \cdot C)$ ;  $\lambda_8 - коэффициент теплопровод$  $ности грунта внутри техподполья, <math>BT/(m^2 \cdot C)$ .

Граничные условия (4) для слоя 2 (слой теплоизоляции):

$$\begin{cases} \Pi \mathbf{p}\mathbf{u} \ \tilde{o} = \tilde{o}_{n0}; y_{n0} \leq y \leq y_n; \alpha_{B1}(T_B - T_{x_{n0}}) = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}; \\ \mathbf{п}\mathbf{p}\mathbf{u} \ \tilde{o} = x_{n1}; y_{n0} \leq y \leq y_n; \dot{O}_2 = \dot{O}_3; \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x}; \\ \mathbf{п}\mathbf{p}\mathbf{u} \ x_{n0} \leq \tilde{o} \leq x_{n1}; y = y_n; q = f(\tau, \dot{O}_{\dot{A}}); \\ \mathbf{п}\mathbf{p}\mathbf{u} \ x_{n0} \leq \tilde{o} \leq x_{n1}; y = y_{n0}; \dot{O}_2 = \dot{O}_8; \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial \dot{o}} = \lambda_8 \frac{\partial T_8}{\partial \dot{o}}; \end{cases}$$
(4)

Граничные условия (5) для слоя 3 (ограждающая конструкция техподполья):

$$\begin{cases} \Pi p \mathbf{\mu} \ \tilde{o} = x_{n1}; y_{n0} \leq y \leq y_{n}; \dot{O}_{2} = \dot{O}_{3}; \lambda_{2} \frac{\partial T_{2}}{\partial x} = \lambda_{3} \frac{\partial T_{3}}{\partial x}; \\ \Pi p \mathbf{\mu} \ x_{n1} \leq \tilde{o} \leq x_{n2}; y = y_{n0}; \dot{O}_{3} = \dot{O}_{8}; \lambda_{3} \frac{\partial T_{3}}{\partial \phi} = -\lambda_{8} \frac{\partial T_{8}}{\partial \phi}; \\ \Pi p \mathbf{\mu} \ x_{n1} \leq \tilde{o} \leq x_{n2}; y = y_{n}; q = f(\tau, T_{B}); \\ \Pi p \mathbf{\mu} \ \tilde{o} = x_{n2}; y_{n0} \leq y \leq y_{n}; \dot{O}_{3} = \dot{O}_{4}; \lambda_{3} \frac{\partial T_{3}}{\partial x} = \lambda_{4} \frac{\partial T_{4}}{\partial x}, \end{cases}$$
(5)

где  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ ,  $\lambda_4$  – коэффициенты теплопроводности утеплителя, бетонной стены и штукатурки соответственно, Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

Граничные условия (6) для слоя 4 (отделочный слой):

$$\begin{cases} \Pi p \mathfrak{m} \ \tilde{o} = \tilde{o}_{n3}; \ y_{n0} \leq y \leq y_{n2}; \ \alpha_{f} \ _{2}(T_{f} \ -T_{x_{n3}}) = -\lambda_{4} \ \frac{\partial T_{4}}{\partial x}; \\ \Pi p \mathfrak{m} \ \tilde{o} = x_{n3}; \ y_{n1} \leq y \leq y_{n2}; \ \dot{O}_{4} = \dot{O}_{6}; \ \lambda_{4} \ \frac{\partial T_{4}}{\partial x} = \lambda_{6} \ \frac{\partial T_{6}}{\partial x}; \\ \Pi p \mathfrak{m} \ \tilde{o} = x_{n3}; \ y_{n0} \leq y \leq y_{n1}; \ \dot{O}_{4} = \dot{O}_{5}; \ \lambda_{4} \ \frac{\partial T_{4}}{\partial x} = \lambda_{5} \ \frac{\partial T_{5}}{\partial x}; \\ \Pi p \mathfrak{m} \ \tilde{o} = x_{n2}; \ y_{n0} \leq y \leq y_{n}; \ \dot{O}_{3} = \dot{O}_{4}; \ \lambda_{4} \ \frac{\partial T_{4}}{\partial x} = \lambda_{3} \ \frac{\partial T_{3}}{\partial x}; \\ \Pi p \mathfrak{m} \ x_{n2} \leq \tilde{o} \leq x_{n3}; \ y = y_{n}; \ q = f(\tau, \dot{O}_{\dot{A}}); \\ \Pi p \mathfrak{m} \ x_{n2} \leq \tilde{o} \leq x_{n3}; \ y = y_{n0}; \ \dot{O}_{4} = \dot{O}_{8}; \ \lambda_{4} \ \frac{\partial T_{4}}{\partial \phi} = \lambda_{8} \ \frac{\partial T_{8}}{\partial \phi}, \quad (6) \end{cases}$$

где  $\lambda_5$ ,  $\lambda_6$ ,  $\lambda_8$  – коэффициенты теплопроводности грунта снаружи техподполья, снега и грунта внутри техподполья соответственно, Вт/(м<sup>2</sup>·°C),  $\alpha_{H2}$  – коэффициент теплоотдачи на границе «наружная поверхность цокольной стены – наружный воздух», Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

Граничные условия (7) для слоя 5 (грунт снаружи подвального помещения):

$$\left\{ \begin{aligned} \Pi \mathbf{p}\mathbf{\mu} \ \tilde{o} &= x_{n3}; y_{n0} \leq y \leq y_{n1}; \dot{O}_4 = \dot{O}_5; \ \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial x} &= \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x}; \\ \Pi \mathbf{p}\mathbf{\mu} \ x_{n3} \leq \tilde{o} \leq x_n; y = y_{n1}; \dot{O}_5 = \dot{O}_6; \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial y} &= \lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial y}; \\ \Pi \mathbf{p}\mathbf{\mu} \ \tilde{o} &= x_n; y_{n0} \leq y \leq y_{n1}; q = 0; \\ \Pi \mathbf{p}\mathbf{\mu} \ x_{n3} \leq \tilde{o} \leq x_n; y = y_{n0}; \ \dot{O}_5 = \dot{O}_8; \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial \phi} &= \lambda_8 \frac{\partial T_8}{\partial \phi}, \end{aligned}$$
(7)

где  $\lambda_5$  – коэффициент теплопроводности грунта снаружи техподполья, Вт/(м<sup>2</sup>.°С).

По мнению ряда авторов [24, 25] на некотором удалении от здания тепловое влияние здания ослабевает и становится малоощутимым. На этих границах теплообмен практически равен нулю. На некоторых границах слоев 5, 6 и 8 принимаются граничные условия второго рода (ГУ II), подразумевающие отсутствие стока тепла.

Граничные условия (8) для слоя 6 (снежный покров):

ſ

ſ

$$\begin{aligned} \Pi \mathbf{p}\mathbf{H} \, x_{n3} &\leq \tilde{o} \leq x_n; \, y = y_{n2}; \\ \alpha_{H1}(T_{y_{n2}} - T_H) &= -\lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial \phi}, \, \alpha_{H1} = f(v, \tau); T_H = f(\tau); \\ \Pi \mathbf{p}\mathbf{H} \, \tilde{o} = x_n; \, y_{n1} \leq y \leq y_{n2}; q = -\lambda \frac{\partial T_6}{\partial x} = 0; \\ \Pi \mathbf{p}\mathbf{H} \, x_{n3} &\leq \tilde{o} \leq x_n; \, y = y_{n1}; \dot{O}_5 = \dot{O}_6; \lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial y} = \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial y}; \\ \Pi \mathbf{p}\mathbf{H} \, \tilde{o} = x_{n3}; \, y_{n1} \leq y \leq y_{n2}; \dot{O}_4 = \dot{O}_6; \lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial x} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x}, \, (8) \end{aligned}$$

где  $\alpha_{H1}$  – коэффициент теплоотдачи на границе «снежный покров – наружный воздух», определяемый по (14), Вт/(м<sup>2.°</sup>С).

Граничные условия (9) для слоя 7 (воздух снаружи подвального помещения):

$$\Pi \mathbf{p}\mathbf{n} \ \tilde{o} = \tilde{o}_{n}; y_{n2} \le y \le y_{n}; q = 0;$$
  

$$\Pi \mathbf{p}\mathbf{n} \ x_{n3} \le \tilde{o} \le x_{n}; y = y_{n}; q = 0;$$
  

$$\Pi \mathbf{p}\mathbf{n} \ \tilde{o} = x_{n3}; y_{n2} \le y \le y_{n}; \alpha_{i} \ _{2}(T_{i} - T_{x_{n3}}) = -\lambda_{4} \frac{\partial T_{4}}{\partial x};$$
  

$$\Pi \mathbf{p}\mathbf{n} \ x_{n3} \le \tilde{o} \le x_{n}; y = y_{n2}; \alpha_{i} \ _{1}(T_{i} - T_{y_{n2}}) = -\lambda_{6} \frac{\partial T_{6}}{\partial y};$$
  

$$\alpha_{H1} = f(v, \tau); T_{H} = f(\tau).$$
(9)

Граничные условия (10) для слоя 8 (грунт внутри техподполья):

$$\begin{aligned} \Pi \text{ри } \tilde{o}_{0} &\leq \tilde{o} \leq \tilde{o}_{n0}; y = y_{n0}; \alpha_{\dot{A}2} \cdot (T_{\dot{A}} - T_{\dot{\sigma}_{n0}}) = -\lambda_{8} \frac{\partial T_{8}}{\partial y}; \\ \Pi \text{ри } \tilde{o}_{n0} &\leq \tilde{o} \leq \tilde{o}_{n1}; y = y_{n0}; \dot{O}_{2} = \dot{O}_{8}; \lambda_{8} \frac{\partial T_{8}}{\partial y} = \lambda_{2} \frac{\partial T_{2}}{\partial y}; \\ \Pi \text{ри } \tilde{o}_{n1} &\leq \tilde{o} \leq \tilde{o}_{n2}; y = y_{n0}; \dot{O}_{3} = \dot{O}_{8}; \lambda_{8} \frac{\partial T_{8}}{\partial y} = \lambda \frac{\partial T_{3}}{\partial y}; \\ \Pi \text{ри } \tilde{o}_{n2} &\leq \tilde{o} \leq \tilde{o}_{n3}; y = y_{n0}; \dot{O}_{4} = \dot{O}_{8}; \lambda_{8} \frac{\partial T_{8}}{\partial y} = \lambda_{4} \frac{\partial T_{4}}{\partial y}; \\ \Pi \text{ри } \tilde{o}_{n3} &\leq \tilde{o} \leq x_{n}; y = y_{n0}; \dot{O}_{5} = \dot{O}_{8}; \lambda_{8} \frac{\partial T_{8}}{\partial y} = \lambda_{5} \frac{\partial T_{5}}{\partial y}; \\ \Pi \text{ри } \tilde{o} = x_{n}; y_{0} \leq y \leq y_{n0}; \frac{\partial T_{8}}{\partial \tilde{o}} = 0; \\ \Pi \text{ри } \tilde{o} = x_{0}; y_{0} \leq y \leq y_{n0}; \frac{\partial T_{8}}{\partial \tilde{o}} = 0. \end{aligned}$$

$$(10)$$

В качестве дополнительных источников теплоты Q(11) рассматриваются составляющие теплового баланса техподполья  $Q_{or}$  – теплота от инженерных коммуникаций, Вт;  $Q_{nep}$  – теплота, поступающая через перекрытие 1-го этажа, Вт;  $Q_{пнф}$  – теплота, теряемая за счет воздухообмена подвального помещения с окружающей средой, Вт.

$$Q = Q_{\rm or} + Q_{\rm nep} - Q_{\rm unp}. \tag{11}$$

Величина теплопоступлений от инженерных коммуникаций ( $Q_{or}$ ) (трубопроводов системы отопления) вычислялась согласно известным зависимостям для цилиндрической трубы [26], Вт.

Тепловой поток через перекрытие первого этажа (*Q*<sub>nep</sub>) [27] (12), Вт

$$Q_{\rm nep} = \frac{F}{R_{\rm nep}} (\dot{O}_{\rm II} - \dot{O}_{\rm B}), \qquad (12)$$

где F – площадь пола первого этажа, м<sup>2</sup>;  $R_{\rm nep}$  – приведенное сопротивление теплопередаче перекрытия над техподпольем, (м<sup>2</sup>·К)/Вт;  $T_{\rm II}$  – нормируемая температура воздуха внутри помещения над техподпольем, K;  $T_{\rm B}$  – температура воздуха внутри техподполья, K.

Тепловые потери на нагрев воздуха  $Q_{\text{ин}}$  Вт, поступающего через вентиляционные продухи, вычислялись по известным зависимостям, приведенным в [27], Вт.

Начальное условие характеризует распределение температуры во всех областях математической модели в начальный момент времени *т*=0 и имеет вид (13)

$$T_i = T_{\rm cp} = \dot{O}_{\rm H}, \tag{13}$$

где  $T_{\rm cp}$  – температура наружного воздуха.

При определении коэффициента теплоотдачи на различных поверхностях ограждающих конструкций использовались эмпирические зависимости, приведенные в [22], описывающие теплообмен в условиях естественной конвекции. Средние значения коэффициентов теплоотдачи определялись по уравнениям подобия для характерных случаев.

Для описания процесса конвективного теплообмена на границе «снег – наружный воздух» использовались зависимости, приведенные в нормативных документах (14)

$$\alpha = 23\sqrt{v_{\rm cp} + 0, 3},\tag{14}$$

где  $v_{cp}$  – средняя скорость ветра, м/с.

Из зависимости (14) видно, что коэффициент теплоотдачи на границе «снег – наружный воздух» является функцией от скорости движения ветра  $\alpha = f(v_{cp})$ , поэтому в математической модели эта величина задается как переменная.

Ввиду малых температур на поверхностях ограждающих конструкций внутри подвального помещения, а следовательно, и значений количества теплоты, теряемой различными поверхностями в подвальном помещении за счет излучения (1-2%) от суммарных тепловых потерь), этой составляющей теплообмена пренебрегаем.

На основе анализа существующих численных методов решения теплотехнических задач для решения задачи теплообмена чердачного пространства с окружающей средой был выбран широко используемый метод прогонки с неявной разностной схемой [23].

# Тестирование численного решения задачи теплопереноса

Численное решение описанной задачи по вышеизложенному методу осуществлялось с помощью пакета программ, разработанных в объектно-ориентированной среде Delphi 7.0. При создании пакета программ использовался модульный принцип.

Основной программный модуль, реализующий решение уравнения параболического типа общего вида с граничными условиями 1–4 рода в однослойных и многослойных областях и состоящий из более мелких модулей расчета коэффициентов разностной схемы и решения системы разностных уравнений с трехдиагональной матрицей методом прогонки, тестировался на известных аналитических решениях.

Для тестирования расчетного модуля были получены аналитические решения с последующим сравнением их с результатами численного решения.

Результаты сравнения показывают, что максимальное отклонение численного решения от аналитического не превосходит 0,6 %. Это подтверждает корректность выбора и реализации расчетной схемы.

# Сравнение результатов натурных наблюдений с результатами численного решения

Для проведения численного расчета температурных полей ограждающих конструкций проектируемых зданий в климатических условиях г. Якутска в разработанном программном комплексе (свидетельство о Госрегистрации программ [28]) использованы среднемесячные температуры воздуха для указанного города в соответствии с [1].

При проведении численного моделирования температурных полей проветриваемого техподполья приняты следующие допущения:

- Среднемесячные температуры воздуха были приняты равными нормативными (несмотря на то, что программный комплекс позволяет задать любой температурный график, включая изменение температуры воздуха по часам в течение суток).
- 2. Воздухообмен внутри техподполья считался однократным (к=1 ч<sup>-1</sup>).
- Толщина снежного покрова снаружи здания была определена по натурным наблюдениям для данного города.
- При расчете было учтено наличие тепловыделений от инженерных коммуникаций, проходящих в проветриваемом техподполье (обогреваемые сети бытовой канализации).
- Тепловыделения от инженерных коммуникаций были учтены как постоянные для периода

отрицательных температур (квазистационарный режим).

Для обеспечения расчета и подбора эффективной толщины утепляющего слоя для инженерных коммуникаций, проходящих в грунте, было проведено сравнение численного решения и результатов, полученных экспериментальным путем (таблица).

На рис. 2 приведено сравнение численного решения и результатов, полученных экспериментальным путем. Сравнение проводилось для глубины заложения в грунт проектируемых трубопроводов бытовой канализации равное 2 м.



**Рис. 2.** Сравнение численного решения и результатов, полученных экспериментальным путем

*Fig. 2.* Comparison of numerical solution and the results obtained experimentally

Как видно из рис. 2, расхождение эмпирических данных с расчетными незначительно и составляет от 42 до 100 %, что является удовлетворительным для подобного класса задач.

В соответствии с проведенными исследованиями, температуры в массиве грунтов, как в зоне строительства, так и за его пределами, принимаются равными их естественным значениям.

#### Расчет толщины утеплителя для инженерных коммуникаций по результатам численного решения

В соответствии с численным расчетом с использованием разработанного программного комплекса, были определены температуры воздуха на уровне техподполья в период отрицательных температур, а также в грунте под зданием. Как показало решение с использованием программного комплекса, температура грунта под зданием и за его пределами близка к температуре грунта в естественном состоянии. Это объясняется тем, что техподполье находится над поверхностью грунта (практически отсутствует влияние тепловых потоков, действующих на грунт через заглубленные строительные конструкции), а также действием низких температур воздуха и проветривания на уровне приземного слоя в техподполье.

Проведенное численное моделирование (прогнозирование) температурных полей в исследуемом объекте позволило провести расчет необходимой толщины утеплителя для системы канализации здания. Расчет толщины утепления трубопроводов в грунте проводился в соответствии с нормативной методикой «Инструкция по проектированию сетей водопровода и канализации для районов распространения вечномерзлых грунтов» [29] по условиям остывания жидкости в конце участка трубопровода.

Температура на конечном участке трубопровода рассчитывалась по зависимости

$$t_{\rm \scriptscriptstyle K} = \frac{\lambda_{\rm \scriptscriptstyle M}}{\lambda_{\rm \scriptscriptstyle T}} t_{\rm \scriptscriptstyle F} + \left( t_{\rm \scriptscriptstyle II} - \frac{\lambda_{\rm \scriptscriptstyle M}}{\lambda_{\rm \scriptscriptstyle T}} t_{\rm \scriptscriptstyle F} \right) \mathring{a}^{-\varphi}. \tag{15}$$

где  $t_r$  — это температура в грунте на уровне прокладки инженерных сетей, °С (в расчете принято, что тепловое влияние от проектируемого здания на прилегающие грунты незначительно и температура в грунте может быть принята на основании натурных исследований и численного прогноза,  $t_r$ =-2 °C);  $t_n$  — температура сточных вод в системе канализации, ( $t_n$ =18 °C);  $\lambda_{\rm M}$ ,  $\lambda_r$  — теплопроводность грунта в зоне прокладки в мерзлом и талом состоянии соответственно, Вт/(м·°C).

Теплопроводность грунта определялись на основании проведенного натурного анализа их типа методом бурения скважин. Преобладающий тип грунтов – суглинок.

Значение  $\phi$  в (15) определялось как

$$\varphi = \frac{vKl}{CG},\tag{16}$$

где v – коэффициент, зависящий от степени заполнения трубопровода (для рассматриваемого случая v=0,9); K – коэффициент теплопередачи, BT/(м·°C)

(для трубопроводов с изоляцией  $K = \frac{1}{R_{_{\rm H}} + \frac{R_{_0}}{\lambda_{_{-}}}}$ 

 $(R_{\rm H}$  – сопротивление теплопередаче утепляющего слоя,  $R_0$  – сопротивление теплопередаче трубопровода); l – длина участка, м; G – расход стоков на участке, кг/ч.

При расчете необходимой толщины утеплителя было принято, что температура стоков не должна быть ниже температуры +5 °C.

В качестве утеплителя трубопроводов подземной части системы канализации были использованы скорлупы из пенополиуретана ( $\lambda$ =0,041 Вт/(м·°С). Для утепления магистралей, проходящих на уровне техподполья, были использованы маты минераловатные *Rockwool*. Расчет толщины утеплителя фирмы *Rockwool* производился с помощью программы той же фирмы.

Как показал расчет по зависимостям (15, 16), необходимая толщина утеплителя для подземной части составила 70 мм (остывание происходит до температуры +6,8 °С), толщина утеплителя в техподполье 50 мм.

Кроме того, для обеспечения отогревания трубопроводов, например, в период аномально низких температур воздуха, все трубопроводы канализации, проложенные надземно, снабжены «греющим» кабелем.

#### Заключение

В результате проделанной работы была рассмотрена двумерная нестационарная симметричная задача теплопроводности в полуограниченном массиве с совокупностью граничных условий. Была предложена физико-математическая модель теплообмена техподполья здания с учетом влияния воздухообмена и снегового покрова снаружи здания.

Была проведена серия натурных экспериментов в климатических условиях г. Якутска по определению типов грунта, находящихся в зоне строительства. Анализ проводился на разных глубинах с определением температур для некоторых месяцев в году (таблица).

Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными показало, что расхождение их незначительно и составляет от 42 до 100 % (рис. 2), что является удовлетворительным для подобного класса задач.

Результаты численного моделирования показали, что теплота, поступающая через перекрытие над техподпольем и через стены, практически не влияет на температурное поле грунтов как под зданием, так и на расстоянии от него. Данный вывод полностью соответствует требованиям к строительству зданий в климатических условиях г. Якутска, которые «запрещают» тепловое воздействие проектируемых зданий на естественный температурный фон грунтов.

В соответствии с проведенными исследованиями, температуры в массиве грунтов за пределами зоны строительства принимаются равными их естественным значениям.

На основании прогноза температурных полей с помощью моделирования тепловых процессов был произведен расчет необходимой толщины теплоизолирующего слоя инженерных коммуникаций, проходящих в техподполье, грунте внутри и снаружи здания.

Сравнение результатов численного решения с решением, полученным из других теплотехнических компьютерных программ (например, Temper-3D), показало их удовлетворительную согласованность. Тем не менее, программа Temper-3D не учитывает воздухообмен в техподполье, который играет существенную роль при формировании температурных полей в ограждающих конструкциях и грунте.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- СП 131.13330.2012 Строительная климатология взамен СНиП 23-01-99\*. Введ. 01.03.2013. – М.: Минрегион России, 2012. – 113 с.
- Порхаев Г.В. Тепловое взаимодействие зданий и сооружений с вечномерзлыми грунтами. – М.: Наука, 1970. – 208 с.
- Крылов Д.А., Федотов А.А. Температурный режим вечномерзлого грунта под зданием со свайным фундаментом // Вестник МГТУ. – 2013. – № 3. – С. 106–116.
- Крылов Д.А., Сидняев Н.И., Федотов А.А. Интегральный метод в задачах математического моделирования распределения температурных полей // Математика и математическое моделирование: Сб. докл. IV Всеросс. молодежной научно-инновационной школы. – Саров, 19–22 апреля 2010. – Саров: СарФ-ТИ НИЯУ МИФИ, 2010. – С. 72–76.
- Крылов Д.А. Математическое моделирование температурных полей с учетом фазовых переходов в криолитозоне // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование». – 2012. – № 04, апрель. URL: http://technomag.edu.ru/doc/354740.html (дата обращения 28.07.2014).
- Дячек П.И., Макаревич С.А. Формирование температурного поля грунтов у здания // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика: международный научно-технический и производственный журнал. – 2007. – № 3. – С. 77–86.
- Мельникова Ю.С. Математическое моделирование управления нестационарным температурным полем в двухфазных средах // Наука и образование. 2012. URL: http://www.technomag.edu.ru/doc/330390.html (дата обращения 28.07.2014).
- Синицын А.А., Карпов Д.Ф., Суханов И.А. Решение проблемы оттаивания мерзлых грунтов при подготовительных строительных работах в условиях малоэтажной застройки // Малоэтажное строительство в рамках Национального проекта «Доступное и комфортное жилье гражданам России»: технологии и материалы, проблемы и перспективы развития в Волгоградской области: Матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2009. – С. 99–101.
- Основы математического моделирования распределения температурных полей в многофазных средах / Н.И. Сидняев и др. // Математика и математическое моделирование: Матер. Четвертой Всеросс. молодежной науч.-инновационной школы. – Саров: Изд-во «Альфа», 2010. – С. 86–93.
- Lunardini J. Virgil. Effect of convective heat transfer on thawing of frozen soil // Seventh International Conference, Collection Nordicana. - Canada, 1998. - P. 689-695.
- Ebenezer E.K. Predicting Temperature Profiles in Soil During Simulated Forest Fires. – Saskatoon: University of Saskatchewan, 2006. 183 p.

- Ming Zhu, Michalowski R.L. Simulation of Heat Transfer in Freezing Soils Using ABAQUS // ABAQUS Users' Conference. – Michigan, 2005. p.p. 1 – 7.
- Deru M. Model for Ground-Coupled Heat and Moisture Transfer from Buildings. PhD. Thesis. - USA: Colorado, 2003. 153 p.
- Belmiloudi A. Heat transfer mathematical modeling. Numerical methods and information technology. - Croatia: InTech, 2011. 654 p.
- 15. Louis Th. Heat Transfer Applications for the Practicing Engineer. – New Jersey, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011. p. 664.
- Annaratone D. Engineering Heat Transfer. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag Berlin 2010. 344 p.
- Lienhard IV J.H., Lienhard V J.H. A Heat Transfer Textbook. USA; Cambridge; MA: Phlogiston press, 2011. 766 p.
- Serth R.W. Process Heat Transfer. USA: Elsevier Science and Technology Book, 2007. 755 p.
- Тетрег-3D. Компьютерная программа для ЭВМ. URL: https://www.temper3d.ru/ (дата обращения 28.07.2014).
- Карауш С.А., Лысак И.А., Анисимов М.В. Математическое моделирование теплового состояния подвального помещения // Вестник ТГАСУ. – 2006. – № 2. – С. 133–141.
- СП 118.13330.2012 Общественные здания и сооружения. Взамен СНиП 31-06-2009. Введ. 01.01.2013. М.: Минрегион России, 2012. 53 с.
- 22. СНиП 2.06.04-82\*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). – М.: Госстрой России, 1989. – 49 с.
- Самарский А.А., Гулин А.В. Устойчивость разностных схем. М.: Наука, 1973. – 415 с.
- Гиндоян А.Г. Тепловой режим конструкций полов. М.: Стройиздат, 1984. – 222 с.
- Прогнозирование теплового состояния грунтов при освоении северных районов / В.П. Чернядьев, А.Л. Чеховский, А.Я. Стремяков, В.А. Накулин. – М.: Наука, 1984. – 137 с.
- СП 23-101-2004. Прооектирование тепловой защиты зданий. Взамен СП 23-101-2000; введ. 26.03.2004 – М.: Госстрой России, 2004. – 86 с.
- СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Взамен СНиП 2.04.05 91\*; введ.01.01.2004. М.: Изд-во стандартов, 2004. 54 с.
- Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. № 2007611123, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19.03.2007; заявка. № 2007610281.
- 29. СН 510-78. Инструкция по проектированию сетей водоснабжения и канализации для районов распространения вечномерзлых грунтов: введ. 11.12.78. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 78 с.

Поступила 27.02.2015 г.

#### UDC 697.133

## PREDICTION OF TEMPERATURE FIELDS OF BUILDING ENVELOPES AND GROUND FOR CALCULATING THE HEAT INSULATION OF ENGINEERING LINES IN THE CLIMATIC CONDITIONS OF YAKUTSK

#### Maksim V. Anisimov,

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

#### Vitaly S. Rekunov,

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

**The relevance** of the research is caused by the necessity to maintain the effective heat insulation of engineering lines at their underground laying in a zone of permafrost soils.

**The aim** of the research is to predict temperature fields in building envelopes using the developed program complex, and in ground under a building and near it in the climatic conditions of Yakutsk; work out recommendations for effective warming of the engineering networks laid underground.

**Methods.** The authors propose physical-mathematical model of the thermal state of underground taking into account the air exchange and design features of construction in permafrost conditions Numerical solution of the problem using the developed software package is made.

**Results.** The authors developed the computational scheme of predicting temperature fields in building envelopes, in the ground under a building and near it in climatic conditions of Yakutsk. Numerical simulation of temperature fields' change of the basic building envelopes and the soil during a year was carried out. The comparative analysis of the obtained results with the empirical ones shown their satisfactory coordination. The authors selected the effective thickness of a warming layer of engineering lines at their underground laying in a zone of permafrost. Two-dimensional non-stationary symmetric problem of heat conductivity in semi-limited mass with a set of boundary conditions was considered. The authors proposed physical-mathematical model of heat exchange in a technical underground of a building taking into account the influence of air exchange and snow cover outside of a building and carried out a series of field experiments in Yakutsk to define the types of soil in a zone of construction. The results of numerical simulation showed that the warmth coming through the ceiling over technical underground and through the walls, does not actually influence the temperature of soils both under the building, and at distance from it. According to the carried out researches, temperatures in soil mass outside the construction zone are equal to their natural values. Comparison of results of the numerical solution with the solution obtained from other computer programs (for example, Temper-3D) showed their satisfactory coordination. Nevertheless, the program Temper-3D does not consider air exchange in a technical underground, which plays an essential role in formation of temperature fields in building envelopes and soil.

#### Key words:

Air exchange, permafrost soils, building envelopes, temperature fields, aired technical underground.

#### REFERENCES

- SP 131.13330.2012 Stroitelnay klimatologiya [State of rules 131.13330.2012. Building climatology]. Moscow, Minregion Rossiya, 2012. 113 p.
- Porkhaev G.V. Teplovoe vzaimodeystvie zdany i sooruzeniy s vechnomerzlymi gruntami [Thermal interaction of buildings and structures with permafrost soils]. Moscow, Nauke Publ., 1970. 208 p.
- Krylov D.A. Temperaturny rezhim vechnomerzlogo grunta pod zdaniem so svaynym fundamentom [Temperature regime of permafrost soil under the building with the pile foundation]. Vestnik MGTU, 2010, no. 3, pp. 106–116.
- Krylov D.A., Sidnev N.I., Fedotov A.A. Integralny method v zadachakh mathematicheskogo modelirovaniya raspredeleny temperaturnykh poley [The integral method in the mathematical modeling of distribution of temperature fields]. Sbornik dokladov 6 Vserossiyskoy molodezhnoy nauchno-innovatsuonnoy shkoly: Matematika i matematicheskoe modelirovanie [Proc. IV All-Russian Youth Scientific and innovative school]. Sarov, 2010. pp. 72-76.
- Krylov D.A. Matematicheskoe modelirovanie temperaturnykh poley s uchetom fazovykh perekhodov v kriozolite [Mathematical modeling of thermal fields with allowance for phase transitions in the permafrost zone]. *Electronic scientific and technical publication «Science and Education»*, 2012, no. 4, April. Available at: http://technomag.edu.ru/doc/354740.html (accessed 28 July 2014).

- Dyachek P.I., Makarevich S.A. Formirovanie temperaturnogo polya gruntov u zdanya [Formation of temperature field of soils at the building]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energetichesrikh obedineniy SNG. Energetika: mezhdunarodny nauchnotekhnicheskiy i proizvodstvennyi zhernal, 2007, no. 3, pp 77–86.
- Melnikova Yu.S. Matematicheskoe modelirovanie upravleniya nestatsionarnym temperaturnym polem v dvukhfaznykh sredakh [Mathematical simulations of non-stationary temperature field in two-phase media]. Nauka i obrazovanie, 2012, Available at: http://www.technomag.edu.ru/doc/330390.html (accessed 28 July 2014).
- 8. Sinitsyn A.A., Karpov D.F., Sukhanov I.A. Reshenie problemy ottaivaniya merzlykh gruntov pri podgotovitelnykh stroitelnykh rabotakh v usloviyakh maloetaznoy zastroyki [Solution to the problem of thawing frozen soils during preparatory construction work in conditions of low buildings]. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Maloetazhnoe stroitelslvo v ramkakh Natsionalnogo proekta «Dostupnoe i komfortnoe zhile grazhdanam Rossii»: tekhnologii i materially, problemy i perspektivy razvitiya v Volgogradskoy oblasti» [Low-rise construction in the framework of the National project «Affordable and comfortable housing to Russian citizens»: technologies and materials, problems and development prospects in the Volgograd, 2009. pp. 99–101.
- 9. Sidnyaev N.I. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya raspredeleniya temperaturnykh poley v mnogofaznykh sredakh [Funda-

mentals of mathematical modeling of distribution of temperature fields in multiphase media]. *Materialy chetvertoy Vserossiiskoy molodezhnoy nauchno-innovatsionnoy shkoly* [Proc. of the Fourth All-Russian youth scientific-innovative school]. Sarov, 2010. pp. 86-93.

- Lunardini J. Virgil. Effect of convective heat transfer on thawing of frozen soil. Seventh International Conference, Collection Nordicana. Canada, 1998, pp. 689–695.
- Ebenezer E.K. Predicting Temperature Profiles in Soil During Simulated Forest Fires. Saskatoon, University of Saskatchewan, 2006. 183 p.
- Ming Zhu, Michalowski R.L. Simulation of Heat Transfer in Freezing Soils Using ABAQUS. ABAQUS Users' Conference. Michigan, 2005. pp. 1–7.
- 13. Deru M., A Model for Ground-Coupled Heat and Moisture Transfer from Buildings. PhD thesis. USA, Colorado, 2003, 153 p.
- Belmiloudi A. Heat transfer mathematical modeling. Numerical methods and information technology. Croatia: InTech, 2011. 654 p.
- Louis Th. Heat Transfer Applications for the Practicing Engineer. New Jersey, Hoboken, John Wiley & Sons, Inc., 2011. 664 p.
- Annaratone D. Engineering Heat Transfer. Berlin; Heidelberg, Springer-Verlag Berlin, 2010. 344 p.
- 17. Lienhard IV J.H., Lienhard V J.H. A Heat Transfer Textbook. USA; Cambridge; MA, Phlogiston press, 2011. 766 p.
- Serth R.W. Process Heat Transfer. USA, Elsevier Science and Technology Book, 2007. 755 p.
- Temper-3D. Konpyuternay programma dlya IBM [Computer software]. Available at: (https://www.temper3d.ru/) (accessed 28 July 2014).
- Karaush S.A. Matematicheskoe modelirovanie teplovogo sostoyaniya podvalnogo pomeshcheniya [Mathematical simulation of thermal condition in a cellar]. Vestnik TGASU, 2006, no. 2, pp. 133-141.

- SP 118.13330.2012 Obshchcestvennye zdaniya i sooruzheniya [State of rules 118.13330.2012. Public buildings]. Moscow, Minregion Russiya, 2012. 53 p.
- SNiP 2.06.04-82\*. Nagruzki i vozdeystviya na gidrotekhnicheskie sooruzheniya [Rules of construction 2.06.04-2003. Hydrotechnical construction load and influence]. Moscow, Gosstroy Russiya, 1989. 49 p.
- Samarsky A.A. Ustoychivost raznostnykh skhem [Stability of difference schemes]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 415 p.
- Gindoyan A.G. Teplovoy rezhim konstruktsy polov [Heat regime of floor construction]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984. 222 p.
- Chernadiev V.P. Prognozirovanie teplovogo sostoyania gruntov pri osvoenii severnykh rayonov [Prediction of soil heat condition in developing northlands]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 137 p.
- SP 23-101-2004. Proektirovanie teplovoy zashchity zdaniy [State of rules. Planning thermal protection of buildings]. Moscow, Gosstroy Russiya, 2004. 86 p.
- SNiP 41-01-2003. Otoplenie, ventilyatsiya i konditsionirovanie [Rules of construction 41-01-2003. Heating, ventilation and conditioning]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 2003. 54 p.
- Lysak I.A., Karaush S.A., Anisimov M.V. Svidetelstvo ob ofitsialnoy registratsii programmy dlya IBM [The certificate of official registration of computer programs no. 2007611123]. Zaregistrirovano v Reestre program dlya EBM 19.03.2007; zayavka no. 2007610281.
- 29. SN 510-78. Instruktsiya po proektirovaniyu setey vodosnabzeniya i kanalizatsii dlya rayonov rasprostraneniya vechnomerzlykh gruntov [Manual for the design of water supply networks and sewage systems for the areas of permafrost soil]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1978. 78 p.

Received: 27 February 2015.

#### УДК 621.311.001.57

## УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМЫХ ПЕРЕТОКОВ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В КОНТРОЛИРУЕМЫХ СЕЧЕНИЯХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

#### Поляков Иван Александрович,

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Энергетического факультета Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, Россия, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 46. E-mail: neomoria@gmail.com

При управлении режимом работы энергосистем одним из основных контролируемых и регулируемых параметров является переток активной мощности в контролируемых сечениях энергосистем (далее – переток). Допустимые величины этих перетоков задаются для соблюдения требований устойчивости. В виду фактической зависимости величин допустимых перетоков от различных факторов (температура окружающей среды, топология прилегающей сети, состав и загрузка генерирующего оборудования, состояние и настройка устройств противоаварийной автоматики и т. д.) и соответствующих требований к их учету расчет допустимых перетоков становится все более трудоемкой задачей. Она осложняется тем, что в энергосистеме происходят различные изменения: изменяется топология сети с вводом нового оборудования или выводом существующего из эксплуатации, изменяются параметры сетевого и генерирующего оборудования, происходит перераспределение нагрузок в узлах сети в соответствии с суточными и сезонными ритмами и т. д. В этих случаях требуется анализ соответствия заданных величин допустимых перетоков изменившейся энергосистеме. Точный анализ заключается в пересчете величин допустимых перетоков и в сравнении их с текущими – заданными величинами с последующей корректировкой. В соответствии с этим в настоящий момент актуальным является создание алгоритмов и методик, позволяющих сократить количество расчетов, необходимых для описания величин допустимых перетоков, а затем – автоматизация процесса расчета допустимых перетоков.

**Цель исследования:** разработка упрощенного метода расчета допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях энергосистем.

**Методы исследования.** Исследование проведено с использованием анализа уравнений установившегося режима энергосистем, а также моделирования в программе для расчета установившегося режима «RastrWin».

**Результаты.** Предложен упрощенный метод расчета допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях энергосистем. Метод опробован при расчете допустимых перетоков в контролируемом сечении. Пример представлен в статье.

#### Ключевые слова:

Энергосистема, сечение, устойчивость, максимально допустимый переток, аварийно допустимый переток.

ЕЭС России сегодня – крупное энергетическое объединение, состоящее из 69 параллельно работающих региональных энергосистем, в совокупности имеющих установленную мощность генерации 232,5 ГВт [1]. При этом ЕЭС относится к классу нелинейных сложных динамических систем, математический анализ которых не бывает полным изза невозможности подробного математического описания происходящих в ней процессов [2]. В [3] подчеркнуто, что хранение и использование максимального количества информации не только не является путем улучшения анализа режимов энергосистем, но и вовсе недопустимо.

При управлении режимом энергосистем одним из основных контролируемых и регулируемых параметров является переток активной мощности в контролируемых сечениях энергосистем, используемых для расчета ключевого показателя эффективности «Показатель эффективности оперативнодиспетчерского управления по обеспечению устойчивости режимов работы ЕЭС» [4]. Для назначения допустимых значений (максимально допустимых далее МДП и аварийно допустимых – далее АДП) перетоков активной мощности в контролируемых сечениях энергосистем необходимо рассматривать ряд различных режимов в соответствии с ограничениями, изложенными в [5], представленными в табл. 1 (в данной статье рассматриваются установившиеся режимы и их ограничения).

Таблица 1.	Факторы,	ограничие	ał	ощие	величины	перетоков
	активной	мощности	В	контр	олируемы	х сечениях
	энергосис	тем				

 Table 1.
 Factors, which constraint the values of active power flows in controlled sections of power systems

	Допуст	Допустимый переток/Allowed flow						
Ограничивающий фактор	N maximum	ИДП allowed flow	АДП allowed flow in emergencies					
factor	нормаль- ный normal	послеаварий- ный post-failure	вынужденный forced					
Коэффициент запа- са по статической апериодической устойчивости (%) Static dead-beat stability factor (%)	20	8	8					
Коэффициент за- паса по напряже- нию (%) Voltage factor (%)	15	10	10					
Допустимая токо- вая загрузка сете- вых элементов Allowed current lo- ad of network ele- ments	Длительно допустимая Continuous allowed	С учетом пере- грузки в тече- ние 20 минут With account for overload during 20 mi- nutes	С учетом пере- грузки на время вынужденного режима With account for overload for for- ced mode time					

Сложность определения допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях заключается в необходимости рассмотрения множества установившихся режимов, характеризующих различные схемно-режимные условия, отличающихся топологией, нагрузками и генерацией в узлах и пр. [6, 7]. Также очевидно, что на результат расчета допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях влияет выбор исходного режима и выбор траектории его утяжеления в отношении интересующих перетоков. На рис. 1 показаны два различных исходных режима и различные траектории их утяжеления. Каждой из таких траекторий соответствует своя точка на границе допустимых режимов (показана пунктиром), построенной в выбранных координатах Х, Ү. При этом одна и та же траектория (1.3 и 2.3) при рассмотрении различных исходных режимов 1 и 2 при утяжелении также дает различные результаты. Следует отметить, что граница области допустимых режимов также непостоянна и изменяется, например, в зависимости от топологии сети – в первую очередь - схемы рассматриваемого сечения.



- **Рис. 1.** Различные траектории утяжеления (1, 2 исходные режимы, 1.1–1.3, 2.1–2.3 траектории утяжеления, пунктир граница области допустимых режимов)
- **Fig. 1.** Different weighing trajectories (1, 2 are the original modes, 1.1–1.3, 2.1–2.3 are the weighing trajectories, dotted line is the boundary of the feasible area)

В [8] показано, что невозможно с максимальной точностью задать допустимые перетоки для непрерывно изменяющегося электроэнергетического режима, т. к. это требует рассмотрения всех его возможных вариантов при всех комбинациях параметров схемы замещения. Более того, т. к. из множества возможных состояний энергосистемы она принимает лишь часть (характерные режимы), обусловленную общностью (закономерностью) изменения нагрузок, планированием ремонтной компании, а также незначительным количеством (в отношении к всей сети) незапланированных отключенных сетевых элементов в результате аварий, то при рассмотрении множества режимов значительная их часть не будет иметь место в реальной энергосистеме.

В работах других авторов [9, 10] указываются различные уточнения, являющиеся попыткой адаптации допустимых перетоков к изменяющемуся режиму энергосистемы. Среди них стоит отметить задание допустимых перетоков в зависимости от температуры окружающей среды, схемы элементов, входящих в состав сечения, величины потребления энергорайонов, загрузки электростанций, объемов управляющих воздействий противоаварийной автоматики и т. д. При этом выявление многих влияющих факторов происходит опытным путем и не имеет конкретных методических приемов. Так, например, в [5] указано, что «при необходимости максимально допустимые и аварийно допустимые перетоки задаются как функции от режимных параметров (загрузки отдельных электростанций и/или числа работающих генераторов, перетоков в других сечениях, напряжений в узловых точках и др.). Такие параметры включатся в число контролируемых. В зависимости от конкретных условий в качестве контролируемых могут использоваться и другие параметры режима энергосистемы, в частности, значения углов между векторами напряжений по концам электропередачи. Допустимые значения контролируемых параметров устанавливаются на основе расчетов».

На допустимые перетоки активной мощности в контролируемых сечениях могут влиять даже режимные величины, не имеющие непосредственное отношение к рассматриваемым энергетическим районам и их контролируемым сечениям. Так, в [11] рассмотрен пример влияния внешних межсистемных перетоков активной мощности на допустимый переток активной мощности в рассматриваемом сечении, по связям которого питается энергетический район (рис. 2).



Рис. 2. Схема рассматриваемой сети

#### Fig. 2. Diagram of the network

Для схемы сети (рис. 2) были произведены расчеты допустимых перетоков активной мощности в контролируемом сечении «Энергорайон». Для этого были определены области допустимых режимов


**Рис. 3.** Области допустимых по току режимов: а) нормальная схема и ремонтная схема с отключенным автотрансформатором; б) нормальная схема и ремонтная схема с отключенной ВЛ Энергорайон – Восток; в) нормальная схема и ремонтная схема с отключенной ВЛ Энергорайон – Запад

*Fig. 3.* Feasible current areas: a) normal and maintenance diagrams with disconnected transformer; b) normal and maintenance diagrams with disconnected line Energorayon – East; c) normal and maintenance diagrams with disconnected line Energorayon – West

работы по факту отсутствия перегрузки по току сетевых элементов (автотрансформаторов и воздушных линий, питающих Энергорайон).

Указанные области построены для нормальной (полной) схемы, а также для ремонтных схем с от-

ключенным состоянием одного из автотрансформаторов или одной из воздушных линий. Особенность данных расчетов заключается в определении границы области допустимых режимов в зависимости от межсистемного перетока активной мощности в сечении «На Запад». Наложение области допустимых по току режимов в ремонтных схемах (рис. 3 – контур зеленых областей) на область допустимых по току режимов в нормальной (полной) схеме (рис. 3 – контур желтых областей) позволяет наглядно отразить область режимов, при работе с которыми необходимо иметь управляющие воздействия, реализуемые по факту отключения сетевых элементов (рис. 3 – желтые области). На рис. 3 также представлены графики, отражающие необходимый объем управляющих воздействий на разгрузку сечения «Энергорайон» в зависимости от величины и направления перетоков активной мощности в сечении «На Запад».

Из рис. З видно, что необходим учет взаимосвязи перетоков активной мощности в указанном сечении, который позволяет оценить область допустимых режимов и произвести более тонкую настройку управляющих воздействий противоаварийной автоматики.

Описанный абстрактный пример топологии сети встречается в ЕЭС России. Например, контролируемое сечение «ББУ-1» Филиала ОАО «СО ЕЭС» Алтайское РДУ [12] (рис. 4). По указанному сечению происходит питание Барнаульского, Кулундинского и Бийского энергетических районов. При этом связи 220 кВ, входящие в контролируемое сечение «ББУ-1», шунтируют внешнюю сеть 500 кВ, как в примере на рис. 2.



Fig. 4. Structure of the section BBU-1

Другие методы, изложенные в [6, 13, 14] и использующие векторные измерения, на текущий момент не могут быть реализованы на территории всей ЕЭС ввиду отсутствия в необходимом количестве соответствующих измерительных устройств. Проблема недостатка устройств векторных измерений также отражена и рассмотрена в [15].

Из сказанного выше, а также из [16–20] вытекает необходимость упрощенных методов оценки допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях и расстояния до границы области допустимых режимов, позволяющих, тем не менее, с необходимой точностью охватывать множество фактически существующих электроэнергетических режимов.

В данной работе предложен упрощенный метод определения допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях, который заключается в замене части энергосистемы на эквивалент. Эквивалентирование с целью упрощения дальнейших расчетов производится до минимального числа узлов примыкания рассматриваемой энергосистемы к внешней сети. Примеры с различным числом узлов примыкания представлены на рис. 5.



**Рис. 5.** Определение числа узлов примыкания рассматриваемой энергосистемы к внешней сети

Fig. 5. Determination of a number of the power system connections to the external network

Связь с внешней сетью отражается в виде заданных перетоков активных и реактивных мощностей по ветвям, соединяющим рассматриваемую энергосистему с эквивалентами – узлами примыкания (рис. 6, модель слева). При необходимости рассмотрения послеаварийных режимов для назначения МДП реакция эквивалента отражается балансом активной и реактивной мощности узлов примыкания, а также параметрами эквивалентной связи между узлами примыкания (рис. 6, модель справа).



**ЧИС. Б.** МОДЕЛЬ С ЭКВИВАЛЕНТОМ ВНЕШНЕЙ СЕТИ ДЛЯ ДВУХ УЗЛОВ ПРИМЫКАНИЯ

*Fig. 6.* Model with the external network equivalent for two connections

Суть метода заключается в том, что при любом установившемся режиме внешнюю часть сети можно заменить эквивалентом, воспользовавшись любым методом эквивалентирования, позволяющим сохранить неизменным текущий режим (комплексы напряжения в узлах) неэквивалентируемой части сети, например, методом преобразования многолучевой звезды в многоугольник с диагоналями. При этом всё многообразие электроэнергетических режимов внешней сети сводится к комбинациям указанных выше параметров эквивалентов (рис. 6).

Для примера реализации упрощенного метода рассмотрена модель, изображенная на рис. 7. Расчеты на указанной модели произведены с использованием программного комплекса расчета установившихся режимов «RastrWin3».

Параметры схемы замещения рассматриваемой системы представлены в табл. 2, 3.



Рис. 7. Рассматриваемая полная модель

Fig. 7. Considered full model

 Таблица 2. Параметры узлов рассматриваемой модели

 Table 2.
 Parameters of the considered model nodes

Узел/Node											
Название	Тип	Pn	Qn	Pg	Qmin	Qmax	Vzd	Vnom	del- ta		
Title	pe	MBt MW	Мвар Mvar	MBt MW	Мвар Mvar	Мвар Mvar	кВ kV	кВ kV	0		
Система External system	БУ			-				-	0		
ЭС-1 Power system 1	PU	400	100	400	0	200	220	220	220		
ЭС-2 Power system 2	PU	500	150	100	0	200		220	_		
Отбор мощности Power output	PQ		0								

**Таблица 3.** Параметры ветвей рассматриваемой модели **Table 3.** Parameters of the considered model branches

Ветвь/Branch					
Название /Title	Тип	R	Х		
	Туре	ohm	ohm		
Система – ЭС-1 External system – Power system 1		15	100		
Система – Отбор мощности System – Power output	ЛЭП	7,5	50		
Отбор мощности – ЭС-2 Power output – Power system 2	Electric line	7,5	50		
∋C-1 − ∋C-2 Power system 1 − Power system 2		10	50		

Запишем систему уравнений для расчета установившегося режима в форме баланса токов [21, 22]

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \dot{I}_{21} + \dot{I}_{01} \\ \dot{I}_2 = \dot{I}_{12} + \dot{I}_{32} \\ \dot{I}_3 = \dot{I}_{03} + \dot{I}_{23} \end{cases}$$

Домножим каждое уравнение на сопряженный комплекс напряжения в соответствующем узле:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 \cdot \tilde{U}_1 = \dot{I}_{21} \cdot \tilde{U}_1 + \dot{I}_{01} \cdot \tilde{U}_1 \\ \dot{I}_2 \cdot \tilde{U}_2 = \dot{I}_{12} \cdot \tilde{U}_2 + \dot{I}_{32} \cdot \tilde{U}_2 \\ \dot{I}_3 \cdot \tilde{U}_3 = \dot{I}_{03} \cdot \tilde{U}_3 + \dot{I}_{23} \cdot \tilde{U}_3 \end{cases}$$

Выражения в левой части уравнений – комплексы полной мощности задающего тока в узлах, слагаемые в правой части уравнений – комплексы потоков полной мощности по отходящим связям.

Запишем систему уравнений в виде баланса мощностей:

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = \dot{S}_{21} + \dot{S}_{01} \\ \dot{S}_2 = \dot{S}_{12} + \dot{S}_{32} \\ \dot{S}_3 = \dot{S}_{03} + \dot{S}_{23} \end{cases}$$

Из системы уравнений баланса мощностей вытекает вывод о том, что можно представить связь ЭС-1 с ЭС-2 в виде потока мощности с сохранением баланса мощности в первом уравнении, т. е. без изменения режима узла ЭС-1. После данного эквивалентирования модель принимает вид, показанный на рис. 8. В данном случае ЭС-2 является одним из узлов примыкания ЭС-1 к внешней сети. Упрощение данной модели заключается в том, что в ней не рассматривается состояние связей Система – ЭС-2, а также величина отбора мощности на этой связи.



**Рис. 9.** Области сходимости расчетов режима **Fig. 9.** Convergence regions of mode calculation

Для модели, представленной на рис. 8, произведены расчеты границы сходимости расчета режима при изменении перетока активной мощности в ЭС-1. Данные расчеты произведены для различных параметров  $P_{\text{экв}}$  и  $Q_{\text{экв}}$  эквивалентного узла примыкания ЭС-2. Результаты расчетов представлены на рис. 9. Для фиксированных значений  $Q_{\text{экв}}=0$  Мвар и  $Q_{\text{экв}}=-50$  Мвар изображены замкнутые контуры, охватывающие область сходимости расчетов уславившегося режима в координатах  $P_{\text{экв}}$ ,  $P_{\text{сечение}}$ . Контур, соответствующий условию

 $-50{<}Q_{_{\rm SKB}}{<}0$ , будет находится между двумя описанными выше контурами.

Используемые в примере параметры эквивалента  $P_{_{\rm 3KB}}$  и  $Q_{_{\rm 3KB}}$  являются явными величинами и могут быть непосредственно измерены в полной модели, т. к. это перетоки активной и реактивной мощности по направлению из ЭС-2 в ЭС-1 с замером величины у узла ЭС-2.

Для проверки полученных результатов на полной модели были произведены следующие расчеты: Разгрузка генерации в ЭС-2 при установке генерации в ЭС-1 на уровне *P*<sub>ген</sub>=200 МВт. Предельный по сходимости режим представлен на рис. 10.

Предельный режим соответствует эквиваленту с параметрами  $P_{\text{сечение}}$ =200 МВт,  $P_{\text{экв}}$ =-57,1 МВт,  $Q_{\text{экв}}$ =-57,1 МВт,

- $Q_{_{\text{ЭКВ}}} = -23,5$  Мвар.
- Разгрузка генерации в ЭС-2 при измененном сопротивлении связи Система – Отбор мощности (с 50 на 120 Ом). Предельный по сходимости режим представлен на рис. 11.

Предельный режим соответствует эквиваленту с параметрами  $P_{\text{сечение}}=0$  МВт,  $P_{\text{экв}}=-199,9$  МВт,  $Q_{\text{экв}}=6,3$  Мвар.

 Загрузка генерации в ЭС-2 при наличии отбора мощности. Предельный по сходимости режим представлен на рис. 12.

Предельный режим соответствует эквиваленту с параметрами  $P_{\text{сечение}}$ =-200 МВт,  $P_{\text{экв}}$ =93,9 МВт,  $Q_{\text{экв}}$ =-59,5 Мвар.

Соотнесение результатов расчета на полной и эквивалентной схеме показывает следующее (рис. 9):

Проверочный расчет № 1. Полученная при расчете на полной модели точка границы сходимости имеет координаты (-57,1; 200). При этом -50<Q<sub>экв</sub>=-23,5<0 и точка располагается между контурами для Q<sub>экв</sub>=0 и Q<sub>экв</sub>=-50 Мвар, что говорит о соответствии результатов расчета.



Рис. 10. Предельный по сходимости режим при разгрузке генерации в ЭС-2 в полной модели

Fig. 10. Limiting convergence mode at generation unload in PS-2 in full model



Рис. 11. Предельный по сходимости режим при разгрузке генерации в ЭС-2 в полной модели

Fig. 11. Limiting convergence mode at generation unload in PS-2 in full model



**Рис. 12.** Предельный по сходимости режим при загрузке генерации в ЭС-2 в полной модели **Fig. 12.** Limiting convergence mode at generation load in PS-2 in full model

- Проверочный расчет № 2. Полученная при расчете на полной модели точка границы сходимости имеет координаты (-199,9; 0). При этом 0<Q<sub>экв</sub>=-6,3 и точка располагается немного за контуром для Q<sub>экв</sub>=0 Мвар, что говорит о соответствии результатов расчета.
- Проверочный расчет № 3. Полученная при расчете на полной модели точка границы сходимости имеет координаты (93,9; 200). При этом *Q*<sub>3КВ</sub>=-59,5<-50 и точка располагается немного до контура для *Q*<sub>3КВ</sub>=-50 Мвар, что говорит о соответствии результатов расчета.

Рассмотренный выше пример реализации упрощенного метода затрагивает вопрос нахождения области сходимости в текущем режиме для определения режимов, удовлетворяющих 8 и 20 % запасу по статической апериодической устойчивости [5].

Упрощенный метод также может быть использован при оценке допустимости текущих режимов по токовой загрузке сетевых элементов, уровней напряжения в узлах сети и статической апериодической устойчивости с учетом принципа n-1 (учета запаса на случай перехода в послеаварийный режим) при назначении максимально допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях энергосистем. Для этого необходимо использовать в качестве эквивалентной модель, изображенную на рис. 6 справа (модель для ПАР). В этом случае параметры эквивалента уже не выражены в явном виде, как перетоки мощности по ветвям модели, изображенной на рис. 6 слева (модель для HP). Тем не менее, расчет допустимых перетоков при различных комбинациях этих параметров позволяет охарактеризовать допустимость текущего электрического режима для множества состояний эквивалентируемой части энергосистемы.

### Выводы

- Применение существующих методов расчета областей допустимых режимов для полных моделей крупных энергетических объединений осложнено большим количеством различных состояний установившегося режима.
- Предложен упрощенный метод определения допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях энергосистем, позволяющий сократить количество контролируемых параметров примыкающей внешней сети, участвующих в определении области допустимых режимов.
- 3) Рассмотрен пример реализации упрощенного метода для модели с двумя узлами примыкания при определении области сходимости расчета установившихся режимов. Упрощение в данном примере заключается в отсутствии необходимости контроля состояния связей между узлами примыкания, а также величин отбора мощности на них.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Официальный сайт ОАО «СО ЕЭС». URL: http://so-ups.ru/index.php? id=ees (дата обращения: 13.08.2015).
- Хрущев Ю.В., Заповедников К.И., Юшков А.Ю. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 160 с.
- Аюев Б.И., Бартоломей П.И. Расчеты установившихся режимов в задачах оперативного и автоматического управления ЭЭС. – Екатеринбург: Изд-во УТИ-УПИ, 1999. – 228 с.
- Положение о составе, расчете и применении ключевых показателей эффективности (КПЭ) ОАО «СО ЕЭС». Утверждено решением Совета директоров ОАО «СО ЕЭС» от 27.12.2012 протокол № 136 с изменениями от 27.10.2014 в соответствии с решением Совета директоров ОАО «СО ЕЭС» от 27.10.2014 протокол № 152, 2014. – 22 с.
- Методические указания по устойчивости энергосистем. Утв. приказом Минэнерго России от 30.06.2003 № 277. – 12 с.
- Савченко Д.С. Оценка предельных перетоков по ЛЭП с помощью СМПР // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. V Междунар. науч.-техн. конф. – Томск, 10–14 ноября 2014. – Т. 2. – С. 137–139.
- Поляков И.Д. Анализ возможности выравнивания графика суточного потребления энергосистемы при помощи потребителей с регулируемой нагрузкой // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. V Междунар. науч.-техн. конф. – Томск, 10–14 ноября 2014. – Т. 2. – С. 234–238.
- Поляков И.А. Автоматическое текущее определение величин допустимых по выбранным критериям перетоков в контролируемых сечениях энергосистем // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. IV Междунар. науч.-техн. конф. – Новочеркасск, 14–18 октября 2013. – Новочеркасск: Лик, 2013. – Т. 1. – С. 204–206.
- Алюшенко А.И., Дьячков В.А. Анализ схемно-режимных факторов на пропускную способность первого сечения московского кольца // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. IV Междунар. науч.-техн. конф. – Новочеркасск, 14–18 октября 2013. – Новочеркасск: Лик, 2013. – Т. 1. – С. 48–52.
- Михайленко А.Ф., Репина Е.А. Модернизация централизированной системы противоаварийного управления ОЭС Средней Волги // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. V Междунар. науч.-техн. конф. Томск, 10–14 ноября 2014. Т. 1. С. 435–443.
- Поляков И.А. Влияние внешних перетоков активной мощности на область допустимых режимов работы контролируемых

сечений // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. V Междунар. науч.-техн. конф. – Томск, 10–14 ноября 2014. – T. 1. – С. 331–334.

- Положение по управлению режимами работы энергосистемы Алтайского края и Республики Алтай. Утверждено распоряжением Филиала ОАО «СО ЕЭС» Алтайское РДУ от 31.07.2015 № 65 «О вводе в действие ПУР», 2015. – 363 с.
- Аюев Б.И. О системе мониторинга переходных режимов // Энергорынок. – 2006. – № 2. URL: http://www.e-m.ru/ er/2006-02/22889/ (дата обращения: 10.08.2015).
- 14. Павлушко С.А., Куликов Ю.А., Вольнев В.Н. Инновационные направления развития электроэнергетики // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. IV Междунар. науч.-техн. конф. – Новочеркасск, 14–18 октября 2013. – Новочеркасск: Лик, 2013. – Т. 1. – С. 17–26.
- 15. Бартоломей П.И., Плетнёва Л.В. Оптимизация расстановки устройств РМU для ускорения расчетов режимов ЭЭС // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. IV Междунар. науч.-техн. конф. – Новочеркасск, 14–18 октября 2013. – Новочеркасск: Лик, 2013. – Т. 1. – С. 60–63.
- 16. Применение квадратичной целевой функции для нахождения предельного режима энергосистемы / Г.С. Шабалин, П.В. Чусовитин, А.В. Паздерин, В.А. Тащилин // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. V Междунар. науч.-техн. конф. – Томск, 10–14 ноября 2014. – Т. 1. – С. 185–188.
- Kundur P. Power System Stability and Control. California: EPRI, 1993. - 1199 p.
- Jain T., Singh S.N., Srivastava S.C. Assessment of oscillatory stability constrained available transfer capability // Electrical Power and Energy Systems. - 2009. - № 31. - C. 192-200.
- Jayasekara B., Annakkage U.D. Derivation of an Accurate Polynomial Representation of the Transient Stability Boundary // IEEE transactions on Power Systems. - 2006. - V. 21. - № 4. -P. 1856-1863.
- Zarate L.A.Ll, Castro C.A., Ramos J.L.M., Ramos E.R. Fast computation of Voltage Stability Security Margins using Nonlinear Programming Techniques // IEEE Transactions on Power Systems. - 2006. - V. 21. - № 1. - P. 19-27.
- Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.
- Идельчик В.И. Расчеты установившихся режимов электрических систем / под ред. В.А. Веникова. – М.: Энергия, 1977. – 192 с.

Поступила 14.08.2015 г.

#### UDC 621.311.001.57

# SIMPLIFIED METHOD FOR COMPUTING ALLOWED ACTIVE POWER FLOW IN CONTROLLED POWER SYSTEM SECTIONS

# Ivan A. Polyakov,

Polzunov Altai State technical University, 46, Lenin Avenue, Barnaul, 656038, Russia. E-mail: neomoria@gmail.com

When controlling the load dispatching mode for a power system, one of the crucial parameters to control and to adjust is the active power flow in controlled power system sections (hereinafter referred to as power flow). The tolerance range of these flows is set to guarantee power system stability. Taking into consideration the correlation between the range of allowed power flows and a set of various factors – ambient temperature, contiguous grid topology, security constrained unit commitment, state and adjustment of emergency control schemes, and others – and the requirements for their account, the computation of allowed flows is becoming a more and more laborious assignment. The task is complicated by the fact that power systems are subject to considerable changes in the grid topology due to the commissioning of new equipment or decommissioning of out-of-date one; divergences in parameters, it is required to analyze the compliance of set-point power flows with the changed power system parameters. The precise analysis consists in recalculating flow magnitudes and comparing them with the current set-point flow magnitudes with the view of their further adjustment. Therefore, in order to simplify computations of allowed power flows within the tolerance range, it is important to create such algorithms and methodology that will result in automatization of allowed power flow calculations.

**The main aim** of the study is to work out a simplified method for computing the allowed active power flow in controlled power system sections.

**The methods used in the study:** steady state power system equation analysis and modeling of steady state power systems with «RastrWin» software.

**The results.** The author has proposed the simplified method for computing the allowed active power flow in controlled power system sections. The validity of this method was tested and assessed in the controlled section of model in the article

### Key words:

Power system, section, stability, maximum allowed active power flow, allowed power flow in emergencies.

## REFERENCES

- SO EES. Available at: http://so-ups.ru/index.php? id=ees (accessed 13 August 2015).
- Khrushchev Yu.V., Zapovednikov K.I., Yushkov A.Yu. Elektromechanicheskie perekhodnye protsessy v elektroenergeticheskikh sistemakh [Electromechanical transients in electric power systems]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2010. 160 p.
- Ayuev B.I., Bartolomey P.I. Raschety ustanovivshikhsya rezhimov v zadachakh operativnigo i avtomaticheskogo upravleniya EES [Calculation of steady-state modes in problems of operational and automated control of electric power systems]. Ekaterinburg, UTI-UPI Press, 1999. 228 p.
- Polozhenie o sostave, raschete i primenenii klyuchevykh pokazateley effektivnosti (KPE) OAO «SO EES». Utverzhdeno resheniem Soveta direktorov OAO «SO EES» ot 27.12.2012 protokol № 136 s izmeneniyami ot 27.10.2014 v sootvetstvii s resheniem Soveta direktorov OAO «SO EES» ot 27.10.2014 protokol № 152, 2014 [The regulation on structure, calculation and application of performance factor of «SB EPS». Approved on27 December 2012, no. 136 with the changes on 27.10.2014, no. 152]. 22 p.
- Metodicheskie ukazaniya po ustoychivosti energosistem. Utv. prikazom Minenergo Rossii ot 30.06.2003 № 277 [Guidelines in power system stability. Approved by the Ministry of Energy of the RF, 30.06.2003, no. 277]. 12 p.
- Savchenko D.S. Otsenka predelnykh peretokov po LEP s pomoshchyu SMPR [Estimation of limited flows in ETL by WAMS]. *Elektroenergetika glazami molodezhy: nauchnye trudy V mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Power engineering as viewed by young people. Proc. of the V International scientific conference]. Tomsk, 2014. Vol. 2, pp. 137–139.
- 7. Polyakov I.D. Analiz vozmozhnosti vyravnivaniya grafika sutochnogo potrebleniya energosistemy pri pomoshchi potrebiteley s reguliruemoy nagruzkoy [Analysis of the possibility to level the schedule of daily consumption of power system by consumers with

controlled load]. *Elektroenergetika glazami molodezhy: nauchnye trudy V mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Power engineering as viewed by young people. Proc. of the V International scientific conference]. Tomsk, 10–14 November 2014. Vol. 2, pp. 234–238.

- Polyakov I.A. Avtomaticheskoe tekushchee opredelenie velichin dopustimykh po vybrannym kriteriyam peretokov v kontroliruemykh secheniyakh energosistem [Automatic current determination of the values of the flows allowed by the selected criteria in the controlled sections of power systems]. *Elektroenergetika glazami molodezhy: nauchnye trudy IV mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Power engineering as viewed by young people. Proc. of the IV International scientific conference]. Novocherkassk, 14–18 October 2013. Novocherkassk, Lik Publ., 2013. Vol. 1, pp. 204–206.
- Alyushenko A.I., Dyachkov V.A. Analiz shemno-rezhymnykh faktorov na propusknuyu sposobnost pervogo secheniya moskovskogo koltsa [Analysis of system-mode factors influence on the capacity of Moscow outer ring first section]. *Elektroenergetika* glazami molodezhy: nauchnye trudy IV mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Power engineering as viewed by young people. Proc. of the IV International scientific conference]. Novocherkassk, 14–18 October 2013. Novocherkassk, Lik Publ., 2013. Vol. 1, pp. 48–52.
- 10. Mikhaylenko A.F., Repina E.A. Modernizatsiya tsentralizovannoy sistemy protivoavariynogo upravleniya OES Sredney Volgi [Improvement of centralized system of emergency control over EER of the Middle Volga]. *Elektroenergetika glazami molodezhy: nauchnye trudy V mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Power engineering as viewed by young people. Proc. of the V International scientific conference]. Tomsk, 10–14 November 2014. Vol. 1, pp. 435–443.
- 11. Polyakov I.A. Vliyanie vneshnikh peretokov aktivnoy moshchnosti na oblast dopustimykh rezhimov raboty kontroliruemykh

secheniy [Influence of active power external flows on feasible area of the controlled section opertaion]. *Elektroenergetika glazami* molodezhy: nauchnye trudy V mezhdunarodnoy nauchnotekhnicheskoy konferentsii [Power engineering as viewed by young people. Proc. of the V International scientific conference]. Tomsk, 10–14 November 2014. Vol. 1, pp. 331–334.

- Polozhenie po upravleniyu rezhimami raboty energosistemy Altayskogo kraya i Respubliki Altay. Utverzhdeno rasporyazhenien Filiala OAO «SO EES» Altayskoe RDU ot 31.07.2015 № 65 «O vvode v deystvie PUR» [Regulation on controlling the functioning of power system in Altai region and the Republic of Altai]. 2015. 363 p.
- Ayuev B.I. O sisteme monitoringa perekhodnykh rezhimov [Transient mode monitoring]. *Energorynok*, 2006, no. 2. Available at: http://www.e-m.ru/er/2006-02/22889/ (accessed 10 August 2015).
- Pavlushko S.A., Kulikov Yu.A, Volnev V.N. Innovatsyonnye napravleniya razvitiya elektroenergetiki [Innovations in power engineering development]. Elektroenergetika glazami molodezhy: nauchnye trudy IV mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Power engineering as viewed by young people. Proc. of the IV International scientific conference]. Novocherkassk, 14–18 October 2013. Novocherkassk, Lik Publ., 2013. Vol. 1, pp. 17–26.
- 15. Bartolomey P.I., Pletneva L.V. Optimizatsiya rasstanovki ustroystv PMU dlya uskoreniya raschetov rezhimov EES [Optimization of installing PMU devices to accelerate the calculations of EPS modes]. *Elektroenergetika glazami molodezhy: nauchnye trudy IV* mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Power engineering as viewed by young people. Proc. of the IV International scientific conference]. Novocherkassk, 14–18 October 2013. Novocherkassk, Lik Publ., 2013. Vol. 1, pp. 60–63.

- 16. Shabalin G.S., Chusovitin P.V., Pazderin A.V., Tashchilin V.A. Primenenie kvadratichnoy tselelvoy funktsii dlya nakhozhdeniya predelnogo rezhima energosistemy [Application of quadratic objective to find out the limited mode of the power stystem]. *Elektroenergetika glazami molodezhy: nauchnye trudy V mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Power engineering as viewed by young people. Proc. of the V International scientific conference]. Tomsk, 10–14 November 2014. Vol. 1, pp. 185–188.
- Kundur P. Power System Stability and Control. California, EPRI, 1993. 1199 p.
- Jain T., Singh S.N., Srivastava S.C. Assessment of oscillatory stability constrained available transfer capability. *Electrical Power and Energy Systems*, 2009, no. 31, pp. 192-200.
- Jayasekara B., Annakkage U.D. Derivation of an Accurate Polynomial Representation of the Transient Stability Boundary. *IEEE transactions on Power Systems*, 2006, vol. 21, no. 4, pp. 1856-1863.
- Zarate L.A.Ll, Castro C.A., Ramos J.L.M., Ramos E.R. Fast computation of Voltage Stability Security Margins using Nonlinear Programming Techniques. *IEEE Transactions on Power Sy*stems, 2006, vol. 21, no. 1, pp. 19-27.
- Gurevich Yu.E., Libova L.E., Okin A.A. Raschety ustoychivosti i protivoavariynoy avtomatiki v energosistemakh [Calculation of stability and emergency automation in power systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 390 p.
- Idelchik V.I. Raschety ystanovivshikhsya rezhimov elektricheskikh sistem [Calculation of steady states in power systems]. Ed. by V.A. Venikov. Moscow, Energiya Publ., 1977. 192 p.

Received: 14 August 2015.

#### УДК 544.452.2

# УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В ВОЗДУХЕ СМЕСЕЙ НАНОПОРОШКА АЛЮМИНИЯ С ДИОКСИДАМИ ТИТАНА И ЦИРКОНИЯ К ДЕЙСТВИЮ ФТОРОВОДОРОДНОЙ КИСЛОТЫ В ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ

## Шинкевич Екатерина Викторовна,

аспирант каф. общей и неорганической химии Института физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: hartnett@sibmail.com

# Роот Людмила Олеговна,

канд. техн. наук, доцент каф. общей и неорганической химии Института физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: tolbanova@mail.ru

**Актуальность работы** связана с необходимостью получения нитридов титана и циркония с использованием менее энергозатратных способов: синтез сжигания в воздухе смесей нанопорошка алюминия с диоксидами титана и циркония, и поиском оптимальных условий для максимального выхода нитридов элементов IV группы побочной подгруппы. Тугоплавкие нитриды используются для нанесения декоративных и коррозионностойких покрытий на различные изделия: обрабатывающий инструмент, детали машин, в медицине в качестве зубных имплантатов и в производстве сувениров.

**Цель работы:** установление фазового состава продуктов сгорания смесей нанопорошка алюминия с диоксидами титана, циркония после их обработки раствором плавиковой кислоты и гидразина.

**Методы исследования:** дифференциальный термический анализ (STD Q600, CША), рентгенофазовый анализ (ДРОН-3.0, Россия) **Результаты.** Установлено, что нитриды титана и циркония, полученные при сгорании в воздухе нанопорошка алюминия с их диоксидами, устойчивы в течение 1 часа в растворе плавиковой кислоты и гидразина. При более длительной обработке нитрид титана сохранился, а нитрид циркония растворился, что обусловлено природой химических свойств этих нитридов: снижением полярности связи Ме-О. Не содержащий окислителя раствор плавиковой кислоты с гидразином не активен в комплексообразовании и переводе в раствор α-оксида алюминия, диоксида титана, диоксида циркония, но в то же время в нем растворился алюминий и его соединения, в том числе и нитрид алюминия. После обработки продуктов сгорания смеси нанопорошка алюминия и диоксида титана в течение 1 часа раствором плавиковой кислоты и гидразина интенсивность их рефлексов на рентгенограмме практически не изменилась: нитрид титана – 100 %, α-оксид алюминия – 47,3 %, нитрид алюминия – 14,5 % и диоксид титана – 22,5 %.

#### Ключевые слова:

Нанопорошок алюминия, диоксид титана, диоксид циркония, параметры химической активности, продукты сгорания, синтез сжиганием, тепловой взрыв, нитрид.

#### Введение

Длительное время считалось, что при сгорании в воздухе алюминий окисляется до оксида алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [1, 2]. Позже расчетным путем было показано [3], что азот воздуха может участвовать в процессе горения порошкообразного алюминия, но только на промежуточных стадиях. На примере нанопорошка алюминия было также показано, что его конечные продукты сгорания в воздухе содержали более 30 % кристаллической фазы нитрида алюминия [4]. Уже тогда было установлено, что нанопорошок алюминия сгорает в две стадии, и химическое связывание азота воздуха происходит на второй высокотемпературной стадии горения [5]. Также синтезом сжиганием в воздухе простых веществ были получены нитриды бора, кремния, титана, циркония, хрома, ниобия и тантала [6]. При сгорании смесей нанопорошка алюминия с диоксидами титана, циркония в воздухе стабилизируются фазы соответствующих нитридов (MeN) [7]. В условиях высоких температур (1800-2200 °C) и высокой светимости происходит переход триплетного кислорода (бирадикал) в синглетный не активный кислород (0?0) [8]. В то же время за счет нагревания повышается реакционная способность молекулярного азота, который взаимодействует с металлами или их субоксидами. Достигнутый максимальный выход нитрида титана составляет 80 отн. %, а нитрида циркония – 55 отн. % [7]. Для придания керамике свойств нитридов за счет перколяции [9] такое содержание нитридов не достаточно [10]. Ранее [11] были проведены исследования устойчивости к воде, кислотам и щелочам продуктов сгорания в воздухе смесей нанопорошка алюминия с порошком хрома и с нанопорошками молибдена и вольфрама. Установлено, что наиболее устойчивой кристаллической фазой является α- $Al_2O_3$ , а нитрид алюминия во всех исследованных средах подвергался гидролизу и окислению, в результате чего его содержание снижалось. Учитывая высокую комплексообразующую способность фторид-ионов [12], интерес представляло изучение действия фтороводородной кислоты в восстановительной среде на растворимость сопутствующих нитридам кристаллических фаз, содержащихся в продуктах сгорания нанопорошка алюминия с диоксидами титана, циркония. Для уменьшения действия кислорода на нитриды в раствор травления вводили гидразин-гидрат.

Целью настоящей работы являлось установление фазового состава продуктов сгорания смесей нанопорошка алюминия с диоксидами титана, циркония после их обработки раствором плавиковой кислоты и гидразина.

#### Методики исследования и характеристики образцов

В работе использовали нанопорошок алюминия, полученный в условиях электрического взрыва проводников в среде аргона и пассивированный малыми добавками воздуха [13–15], а также грубодисперсные порошки диоксидов титана и циркония (MeO<sub>2</sub>) марки чда.

Смешение нанопорошка алюминия (НПАІ) с порошками диоксидов проводили в сухом виде механическим способом – растиранием смесей на кальке. С целью равномерного перемешивания и выравнивания распределения компонентов по объему образца и разрушения агломератов все полученные смеси многократно просеивали через сито с размером ячеек 63 мкм.

Синтез нитридсодержащих продуктов осуществляли в воздухе в условиях теплового взрыва: при естественных условиях теплообмена и циркуляции воздуха [16]. Процесс горения инициировали локальным нагревом образца с помощью нихромовой спирали, через которую пропускали импульс электрического тока. После охлаждения продукты сгорания НПАl с диоксидами титана и циркония в воздухе дезагрегировали и обрабатывали в растворе травителя: фтороводородная кислота – 20 мас. %, гидразин-гидрат – 30 мас. %, растворитель – вода.

Предварительно была проведена оценка смесей на пирофорность: определено влияние диоксидов на параметры химической активности исходного нанопорошка алюминия, которые рассчитывали на основе данных дифференциального термического анализа (ДТА), полученных с использованием термоанализатора STD Q600 (США) [6, 17, 18] (Научно-аналитический центр Томского политехнического университета). Образцы нагревали с постоянной скоростью (10 °С/мин) в атмосфере воздуха в интервале 20...1000 °C. Реакционную способность нанопорошков оценивали по следующим параметрам химической активности [17]: температура начала окисления ( $T_{\rm H0}$ , °С), максимальная скорость окисления металла  $\nu_{\rm max}{=}\Delta m/\Delta T$  ( $V_{\rm max},$  мг/мин), степень окисленности (отношение массы окисленного металла к массе исходного металла в образце,  $\alpha$ , %) и тепловой эффект ( $\Delta H$ , Дж/г).

Для определения фазового состава исходных порошков и продуктов их окисления проводили рентгенофазовый анализ (РФА) с помощью дифрактометра ДРОН-3.0 (Россия) (рентгеновская трубка БСВ-9, Си<sub>ка</sub>-излучение). Скорость развертки гониометра составляла 2-4 град/мин. Для идентификации кристаллических фаз, входящих в состав смесей и продуктов их сгорания, использовали картотеку JCPDS ICDD. Содержание кристаллических фаз в исходных смесях и продуктах сгорания определяли путем сравнения их 100 % рефлексов на одной рентгенограмме.

#### Результаты экспериментов

Для оценки безопасности приготовления образцов был проведен ДТА, по результатам которого были рассчитаны 4 параметра активности [15]. В табл. 1 приведены параметры активности НПАІ и смесей нанопорошка алюминия с диоксидами титана и циркония.

Таблица 1. Параметры активности нанопорошка алюминия и исследуемых смесей в условиях нагрева до 660 °C в воздухе

Состав образца Sample structure	Мольное соотноше- ние компонентов Mole ratio of com- ponents	Т <sub>н.о.</sub> , °С	V <sub>max</sub> , мг/мин (mg/min)	α, %	<i>ΔН</i> , кДж/г (kJ/g)
ΗΠΑΙ	-	400	0,1900	31,6	8,8
	1:2	494	0,0299	28,8	6,3
HNAI:TiO <sub>2</sub>	1:1	450	0,0643	32,9	11,1
	2:1	459	0,1116	33,2	17,7
	1:2	489	0,0240	30,5	4,3
HNAI:ZrO <sub>2</sub>	1:1	472	0,0495	32,3	7,9
	2:1	450	0,0792	34,2	13,5

**Table 1.**Parameters of activity of aluminum nanopowder and<br/>the examined mixtures heated to 660  $^{\circ}$ C in the air

НП is nanopowder (NP).

Согласно полученным результатам температура начала окислительного процесса для всех смесей намного выше комнатной температуры и составляет более 450 °C, что свидетельствует о непирофорности исследуемых смесей [19, 20].

Для смесей, содержащих диоксид титана, с ростом его содержания в данных смесях с НПАІ не наблюдалось увеличения химической активности (табл. 1), согласно температуры начала окисления. Для обоих видов смеси наблюдалась тенденция ее снижения: максимально на 44 °С для смесей с диоксидом титана и на 49 °С для смесей с диоксидом циркония, оставаясь выше  $T_{\rm H.0.}$  НПАІ без добавок. С увеличением содержания НПАІ в смесях максимальная скорость окисления последовательно увеличивалась: максимально для смесей с диоксидом титана в 3,7 раза, а для смеси с диоксидом циркония – в 3,3 раза.

Аналогичные закономерности наблюдались для значений других параметров активности: степени окисленности и теплового эффекта – последовательное увеличение этих параметров с ростом НПАІ в смесях с диоксидом титана и с диоксидом циркония (табл. 1). При сгорании смесей с более высоким содержанием НПАІ происходило повышение максимальной температуры и полноты сгорания ( $\alpha$ ), за счет чего на первой стадии горения возраста степень окисленности ( $\alpha$ ) и тепловой эффект ( $\Delta$ H). Согласно проведенному ранее РФА продуктов сгорания нанопорошка алюминия без добавок основной кристаллической фазой является нитрид алюминия, а также  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>3</sub>O<sub>3</sub>N [14].

Выбор соотношения НПАІ: диоксид металла 2:1 связан со следующим: для этих смесей с диоксидом титана и для смеси с диоксидом циркония все параметры активности максимальны. Для исследования продуктов сгорания их дезагрегировали растиранием в агатовой ступе.

Дезагрегированные продукты сгорания обрабатывали раствором травления на основе плавиковой кислоты и гидразина (50 мл) в течение 1, 2, 4, 8, 16 часов. При относительно непродолжительной обработке (1 ч) продуктов сгорания раствором травителя нитрид титана оставался основной кристаллической фазой (рис. 1).

Исходный фазовый состав (рис. 1, a) и состав продуктов сгорания после обработки раствором травителя в течение 1 часа (рис. 1,  $\delta$ ) существенно не изменился: максимальный рефлекс на рентгенограмме соответствовал 100 % рефлексу TiN.

Согласно РФА продуктов сгорания смесей НПА с диоксидом титана (2:1) максимальный рефлекс относился к нитриду титана. Следующий по интенсивности рефлекс соответствовал фазе  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Фаза нитрида алюминия характеризовалась слабым рефлексом – 13,6 %. В продуктах также присутствовала фаза не вступившего в реакцию TiO<sub>2</sub> (22,8 %).

В составе продуктов сгорания смесей HПAl с диоксидом циркония практически отсутствовала фаза AlN. Содержание непрореагировавшего диоксида циркония, согласно РФА, примерно в 2 раза больше, чем диоксида титана в продуктах сгорания. Также примерно в 2 раза меньше содержание  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, в то время как содержание ZrN соответствовало максимальному рефлексу (100 %).

После обработки продуктов сгорания HПAl с  $ZrO_2$  раствором травителя в течение 1 часа содержание 100 % рефлекса фазы  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> увеличилось в 2 раза (рис. 2). Тем не менее, в продуктах сгорания этой смеси основной фазой оставался ZrN. Остальные фазы представлены рефлексами интенсивностью менее 25 отн. %.

Исходный фазовый состав и фазовый состав после обработки раствором травителя продуктов сгорания HIIAl с диоксидами титана и циркония в воздухе представлен в табл. 2.



Рис. 1. Рентгенограммы продуктов сгорания смесей НПАІ с TiO₂ а) без обработки раствором травителя; б) после обработки раствором травителя в течение 1 часа

*Fig. 1.* X-ray patterns of combustion products of AINP with TiO<sub>2</sub> mixture a) without treating with etching solution; b) after treatment with etching solution during 1 hour



Рис. 2. Рентгенограммы продуктов сгорания смесей НПАІ с ZrO₂ а) без обработки раствором травителя; б) после обработки раствором травителя в течение 1 часа

- *Fig. 2.* X-ray patterns of combustion products of AINP with ZrO<sub>2</sub> mixtures a) without treating with etching solution; b) after treatment with etching solution during 1 hour
- Таблица 2. Исходный фазовый состав продуктов сгорания смесей НПАІ с ТіО<sub>2</sub> и НПАІ с ZrO<sub>2</sub> и продуктов их обработки (1 час)
- **Table 2.**Initial phase composition of combustion products of<br/>AINP with  $TiO_2$  and AINP with  $ZrO_2$  mixtures and pro-<br/>ducts of their treatment (1 hour)

Состав образца	Интенсивность 100 % рефлекса фазы Intensity of 100 % phase reflex					
	$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	AIN	MeN	MeO <sub>2</sub>		
	Без обработки/Without treatment					
НПАІ: ТіО <sub>2</sub> (2:1)	52,6	13,6	100	22,8		
НПАІ: ZrO <sub>2</sub> (2:1)	23,5	-	100	41, 6		
	Обработка в течение 1 ч/Treatment during 1 h					
НПАІ: TiO <sub>2</sub> (2:1)	47,3	14,5	100	22,5		
НПАІ: ZrO <sub>2</sub> (2:1)	43,5	-	100	71,5		

После обработки раствором плавиковой кислоты и гидразина (1 час) относительная интенсивность рефлексов на рентгенограмме продуктов сгорания изменилась. Экспериментально установлено, что в продуктах сгорания смеси HПАl с диоксидом циркония фаза нитрида алюминия отсутствовала (табл. 2). В результате обработки травителем относительные содержания нитридов титана и циркония сохранилось: их рефлексы на рентгенограммах максимальны. В то же время возросло содержание  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> приблизительно в 2 раза в продуктах сгорания смесей HПАl с диоксидом циркония. Содержание не сгоревшего диоксида циркония в продуктах сгорания возросло в 3 раза. Следует отметить, что после обработки содержание фазы AlN в продуктах сгорания смесей HПAl с диоксидом титана осталось практически неизменным.

После двух часов действия плавиковой кислотой и гидразина на рентгенограмме наблюдалось дальнейшее изменение в составе продуктов сгорания смесей. В табл. 3 приведены результаты определения их фазового состава после 2 часов воздействия раствора плавиковой кислоты и гидразина.

- Таблица 3. Исходный фазовый состав продуктов сгорания смесей НПАІ с ТіО₂ и НПАІ с ZrO₂ и продуктов их обработки (2 часа)
- **Table 3.**Initial phase composition of combustion products of<br/>AINP with TiO2 and AINP with ZrO2 mixtures and pro-<br/>ducts of their treatment (2 hour)

Состав образца Sample structure	Интенсивность 100 % рефлекса фазы Intensity of 100 % phase reflex				
	$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	AIN	MeN	MeO <sub>2</sub>	
	Без обработки/Without treatment				
НПАІ: ТіО <sub>2</sub> (2:1)	52,6	13,6	100	22,8	
НПАІ: ZrO <sub>2</sub> (2:1)	23,5	-	100	41, 6	
	Обработка в течение 2 ч/Treatment during 2 h				
НПАІ: ТіО <sub>2</sub> (2:1)	57,5	17,0	100	25,3	
НПАІ: ZrO <sub>2</sub> (2:1)	56,9	-	52,9	100	

После обработки продуктов сгорания раствором травителя фазовый состав также изменился, но в продуктах сгорания смесей нанопорошка алюминия с диоксидом титана основной фазой остался нитрид титана, относительное содержание  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и TiO<sub>2</sub> изменилось незначительно, в то же время рефлекс, отнесенный к фазе AlN, возрос на 2,5 % в продуктах сгорания смеси НП Al и ZrO<sub>2</sub>. 100 % рефлекс ZrN уменьшился со 100 до 52,9 %, а основной 100 % рефлекс в продуктах сгорания отнесен к ZrO<sub>2</sub>.

При более длительной обработке (16 ч) продуктов сгорания травителем произошли существенные изменения в фазовом составе. В табл. 4 приведены результаты определения фазового состава после 16 часов воздействия раствора плавиковой кислоты и гидразина.

- Таблица 4. Фазовый состав продуктов сгорания смесей НПАІ с TiO₂ и НПАІ с ZrO₂ и продуктов их обработки (16 часов)
- **Table 4.** Phase composition of combustion products of AINP<br/>with  $TiO_2$  and AINP with  $ZrO_2$  mixtures and products<br/>of their treatment (16 hours)

Состав образца Sample structure	Интенсивность 100 % рефлекса фазы Intensity of 100 % phase reflex					
	$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	AIN	MeN	MeO <sub>2</sub>		
	Без обработки/Without treatment					
НПАІ: TiO <sub>2</sub> (2:1)	52,6	13,6	100	22,8		
HΠAI: ZrO <sub>2</sub> (2:1)	23,5	-	100	41, 6		
	Обработка в течение 16 ч/Treatment during 16 h					
НПАІ: ТіО <sub>2</sub> (2:1)	63,8	17,0	100	25,7		
НПАІ: ZrO <sub>2</sub> (2:1)	61,3	-	46,0	100		

Согласно полученным результатам РФА (табл. 4), в продуктах сгорания смесей нанопорошка алюминия и диоксида титана основной фазой осталась фаза нитрида титана, в то же время примерно в 2 раза уменьшилось содержание фазы нитрида циркония: по сравнению с составом, приведенным в табл. 3. Относительное содержание фазы  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> возросло до 11,2 % в продуктах сгорания HIIAl с TiO<sub>2</sub> и примерно в 3 раза в продуктах сгорания HIIAl с ZrO<sub>2</sub>.

#### Обсуждение результатов

Результаты измерения параметров химической активности (табл. 1) показали, что смеси HIIAl с диоксидами титана и циркония не пирофорны: их приготовление и использование в технологиях керамических материалов безопасно.

Согласно РФА (табл. 2) нитриды титана и циркония устойчивы при относительно коротком времени обработки (1 час) раствором плавиковой кислоты и гидразина, в то же время нитрид титана химически более устойчив в сравнении с нитридом циркония к действию предложенного раствора травителя. После обработки (1 час) продуктов сгорания исследуемых смесей НПАІ и диоксидов (2:1) содержание нитрида титана практически не изменилось (табл. 2), как и нитрида циркония.

При увеличении времени обработки происходило изменение фазового состава, и при обработке в течение 16 часов (табл. 4) содержание нитрида титана не изменилось, а содержание нитрида циркония уменьшилось в 2 раза. В продуктах на рентгенограмме обработанных образцов в области углов меньше 25° имеются рефлексы фаз, не относящихся к исследуемым веществам.

Более высокая устойчивость нитрида титана по сравнению с нитридом циркония к окислению и гидролизу, по-видимому, связана с более высокой ковалентностью (43,8 %) химической связи Ti-N в сравнении с ковалентностью (34,8 %) связи Zr-N [21].

Проведенные эксперименты показали, что плавиковая кислота является слабым комплексообразующим агентом по отношению к продуктам сгорания, не являющимся нитридами. В то же время гидразин не обеспечивает устойчивости нитридов в водном растворе к окислению и гидролизу.

Следовательно, для повышения содержания нитридов титана и циркония в продуктах сгорания НПАІ в смесях с их диоксидами требуется подбор комплексообразователя и стабилизатора нитридов циркония и титана.

## Выводы

 Нитриды титана и циркония, полученные при сгорании в воздухе нанопорошка алюминия с их диоксидами, устойчивы в течение 1 часа в растворе плавиковой кислоты и гидразина. При более длительной обработке нитрид титана сохраняется, а нитрид циркония растворяется, что обусловлено природой химических свойств – полярностью связи металл-азот.

- Не содержащий окислителя раствор плавиковой кислоты с гидразином не активен в комплексообразовании и переводе в раствор α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, но в то же время он растворяет алюминий и его соединения, в том числе и AlN.
- После обработки продуктов сгорания смеси нанопорошка алюминия и диоксида титана в те-

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Горение порошкообразных металлов в активных средах / П.Ф. Похил, А.Ф. Беляев, Ю.В. Фролов и др. – М.: Наука, 1972. – 294 с.
- 2. Самсонов Г.В. Нитриды. Киев: Наукова думка, 1969. 380 с.
- О влиянии азота на горение алюминия / В.М. Боборыкин, В.М. Гремячкин, А.Г. Истратов и др. // Физика горения и взрыва. – 1983. – № 3. – С. 22–29.
- Ильин А.П., Проскуровская Л.Т. Окисление алюминия в ультрадисперсном состоянии на воздухе // Порошковая металлургия. – 1990. – № 9. – С. 32–34.
- Ильин А.П., Проскуровская Л.Т. Двухстадийное горение ультрадисперсного порошка алюминия на воздухе // Физика горения и взрыва. – 1990. – Т. 26. – С. 71–72.
- Горение нанопорошков металлов / А.А. Громов, Т.А. Хабас, А.П. Ильин и др. / под ред. А.А. Громова. – Томск: Дельтаплан, 2008. – 382 с.
- Шинкевич Е.В., Роот Л.О., Ильин А.П. Синтез нитридов сжиганием нанопорошка алюминия в смеси с диоксидами титана, циркония и гафния в воздухе // Огнеупоры и техническая керамика. – 2013. – № 3. – С. 33–38.
- Ильин А.П., Роот Л.О. Новый механизм высокотемпературного химического связывания азота воздуха // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 6 (Ч. 6). – С. 1377–1381.
- Физический энциклопедический словарь / гл. ред. А.Н. Прохоров – М.: Сов. Энциклоп., 1984. – 944 с.
- Порошковая металлургия и напыленные покрытия / под ред. Б.С. Митина. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
- Толбанова Л.О. Синтез керамических нитридосодержащих материалов сжиганием в воздухе смесей нанопорошка алюминия с нанопорошками W и Мо и порошком Cr: автореф. ... канд. техн. наук. – Томск, 2007. – 21 с.
- Крешков А.П. Основы аналитической химии. Теоретические основы. Качественный анализ. Кн. 1, изд. 4-е, перераб. – М.: Химия, 1976. – 472 с.

чение 1 часа раствором плавиковой кислоты и гидразина интенсивность 100 %-х рефлексов практически не изменилась: TiN – 100 %,  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 47,3 %, AlN – 14,5 % и TiO<sub>2</sub> – 22,5 %.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-03-05385.

- Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 289 с.
- 14. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Тихонов Д.В. Особенности получения нанопорошков в условиях электрического взрыва проводников. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 223 с.
- Passivation process for superfine aluminum powders obtained by electrical explosion of wires / Y.-S. Kwon, A.A. Gromov, A.P. Ilyin, G.-H. Rim // Applied Surface Science. – 2003. – V. 211. – № 1–4. – P. 57–67.
- Ильин А.П., Громов А.А. Горение алюминия и бора в сверхтонком состоянии. – Томск: Изд-во Том. Ун-та, 2002. – 154 с.
- Ундландт У. Термические методы анализа. М.: Мир, 1978. 526 с.
- Ильин А.П., Громов А.А., Яблуновский Г.В. Об активности порошка алюминия // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37. – № 4. – С. 58–62.
- Mench M.M., Kuo K.K., Yeh C.L. Comparison of thermal Behavior of regular and Ultrafine Aluminum Powders (Alex) made from Plasma Explosion Process // Comb. Sci. Tech. - 1998. -V. 135. - P. 269-292.
- Characterization of Aluminum Powders. I. Parameters of Reactivity of Aluminum Powders / A. Ilyin, A. Gromov, V. An, F. Faubert et al. // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2002. V. 27. № 6. P. 361-364.
- Энергия разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону. Справочник // под ред. В.Н. Кондратьева. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 170 с.

Поступила 25.06.2015 г.

#### UDC 544.452.2

# STABILITY OF PRODUCTS OF COMBUSTING IN AIR ALUMINUM NANOPOWDER WITH TITANIUM AND ZIRCONIUM DIOXIDES TO HYDROFLUORIC ACID ACTION IN REDUCTIVE MEDIA

# Ekaterina V. Shinkevich,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: hartnett@sibmail.com

## Lyudmila O. Root,

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

**The relevance** of the research is related to the need to obtain titanium and zirconium nitrides using less energy-consuming methods, in particular by combustion synthesis of nitrides in the air using aluminum nanopowder as a reductor. The work is devoted to the finding of the optimum conditions ensuring the maximum yield of the nitrides of the group IV B elements. The refractory nitrides are applied as decorative and corrosion-resistant coatings on various products, such as processing tool, machine parts, as dental implants and for souvenirs production.

**The main aim** of the study is to determine the phase composition of the combustion products of the aluminum nanopowder with titanium and zirconium dioxides after their processing by solution of fluoric acid and hydrazine of treatment.

The methods used in the study: differential thermal analysis (SDT Q 600, USA), X-ray diffraction (DRON-3.0, Russia)

**The result.** Titanium and the zirconium nitrides obtained by combustion of aluminum nanopowder with dioxides ( $TiO_2$ ,  $ZrO_2$ ) in air are stable during 1 hour in the solution of the fluoric acid and the hydrazine. At longer treatment titanium nitride was preserved and zirconium nitride was dissolved that is caused by the nature of chemical properties of these nitrides. The solution of hydrofluoric acid with hydrazine without oxidizer is not active in the complexation and in transfer to the solution of  $\alpha$ -aluminium oxide, titanium dioxide, zirconium dioxide. But at the same time, aluminum and its compounds, including aluminum nitride, were dissolved in this solution. After processing the combustion products of aluminum nanopowder and titanium dioxide mixture for 1 hour with a solution of hydrofluoric acid and hydrazine, the intensity on the X-ray pulses is practically unchanged: titanium nitride – 100 %,  $\alpha$ -aluminium oxide – 47,3 %, aluminum nitride – 14,5 % and titanium dioxide – 22,5 %.

#### Key words:

Aluminum nanopowder, titanium dioxide, zirconium dioxide, chemical activity parameters, combustion products, burning synthesis, thermal explosion, nitride.

The research was partially financially supported by the RFBR grant no.15-03-05385.

#### REFERENCES

- 1. Pokhil P.F., Belyaev A.F., Frolov Yu.V. *Gorenie poroshkoobraznykh metallov v aktivnykh sredakh* [Combustion of powdery metals in active conditions]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 294 p.
- Samsonov G.V. Nitridy [Nitrides]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1960. 380 p.
- Boborykin V.M., Gremyachkin V.M., Istratov A.G. O vliyanii azota na gorenie alyuminiya [Nitrogen influence on aluminum combustion]. *Fizika goreniya i vzryva*, 1983, no. 3, pp. 22–29.
- Ilin A.P., Proskurovskaya L.T. Okislenie aluminiya v ultradispersnom sostoyanii na vozdukhe [Aluminum oxidation in ultrafine air]. Poroshkovaya metallurgiya, 1990, no. 9, pp. 32-34.
- Ilin A.P., Proskurovskaya L.T. Dvukhstadiynoe gorenie ultradispersnogo poroshka alyuminiya na vozdukhe [Two-stage combustion of ultrafine aluminum powder in the air]. *Fizika goreniya i* vzryva, 1990, vol. 26, pp. 71–72.
- Gromov A.A., Khabas T.A., Ilin A.P. Gorenie nanoporoshkov metallov [Combustion of metal nanopowders]. Ed. by A.A. Gromov. Tomsk, Deltaplan Publ., 2008. 382 p.
- Shinkevich E.V., Root L.O., Ilin A.P. Sintez nitridov szhiganiem nanoporoshka alyuminiya v smesi s dioksidami titana, tsirkoniya i gafniya v vozdukhe [Synthesis of nitrides by combusting aluminum nanopowder mixed with the dioxides of titanium, zirconium and hafnium in the air]. Ogneupory i tekhnicheskaya keramika, 2013, no. 3, pp. 33–38.
- Ilin A.P., Root L.O. Novy mekhanizm vysokotemperaturnogo khimicheskogo svyazyvaniya azota vozdukha [The new mechanism of high-temperature chemical bonding of air nitrogen]. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2013, no. 6 (P. 6), pp. 1377–1381.

- Fizicheskiy entsiklopedicheskiy slovar [Physical encyclopedic dictionary]. Ed. by A.N. Prokhorov. Moscow, Sovetskaya Entsiklopediya Publ., 1984. 944 p.
- Poroshkovaya metallurgiya i napylennye pokrytiya [Powder of metallurgy and sprayed coatings]. Ed. by B.S. Mitin. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987. 792 p.
- 11. Tolbanova L.O. Sintez keramicheskikh nitridosoderzhashchikh materialov szhiganiem v vozdukhe smesey nanoporoshka alyuminiya s nanoporoshkami W i Mo i poroshkom Cr. Avtoref. Kand. nauk [Synthesis of ceramic nitriloacetic materials by burning in the air the mixtures of aluminum nanopowder with W and Mo nanopowders and Cr powder. Cand. Sc. Abstract]. Tomsk, 2007. 21 p.
- Kreshkov A.P. Osnovy analiticheskoy khimii. Teoreticheskie osnovy. Kachestvenny analiz [Fundamentals of analytical chemistry. The theoretical bases. The qualitative analysis]. Moscow, Khimiya Publ., 1976. B. 1, 472 p.
- Burtsev V.A., Kalinin N.V., Luchinskiy A.V. Elektricheskiy vzryv provodnikov i ego primenenie v elektrofizicheskikh ustanovkakh [The electric explosion of conductors and its application in electrophysical installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 289 p.
- Ilin A.P., Nazarenko O.B., Tikhonov D.V. Osobennosti polucheniya nanoporoshkov v usloviyakh elektricheskogo vzryva provodnikov [Features of preparing nanopowders under conditions of electric explosion of conductors]. Tomsk, Publ. house of TPU, 2013. 223 p.
- 15. Kwon Y.-S., Gromov A.A., Ilyin A.P., Rim G.-H. Passivation process for superfine aluminum powders obtained by electrical explo-

sion of wires. Applied Surface Science, 2003, vol. 211, no. 1–4, pp. 57–67.

- Ilin A.P., Gromov A.A. Gorenie alyuminiya i bora v sverkhtonkom sostoyanii [The combustion of aluminum and boron in superfine condition]. Tomsk: Tom. University Publ., 2002. 154 p.
- Undlandt U. Termicheskie metody analiza [Thermal methods of analysis]. Moscow, Mir Publ., 1978. 526 p.
- Ilin A.P., Gromov A.A., Yablunovskiy G.V. Ob aktivnosti poroshka alyuminiya [Aluminum powder activity]. *Fizika goreniya i vzryva*, 2001, vol. 37, no. 4, pp. 58–62.
- 19. Mench M.M., Kuo K.K., Yeh C.L. Comparison of thermal Behavior of regular and Ultrafine Aluminum Powders (Alex) made

from Plasma Explosion Process. Comb. Sci. Tech., 1998, vol. 135, pp. 269–292.

- Ilyin A., Gromov A., An V., Faubert F. Characterization of Aluminum Powders I. Parameters of Reactivity of Aluminum Powders. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2002, vol. 27, no. 6, pp. 361-364.
- Energiya razryva khimicheskikh svyazey. Potentsialy ionizatsii i srodstvo k elektronu. Spravochnik [Energy to break chemical bonds. Ionization potentials and electron affinity]. Ed. by V.N. Kondratev. Moscow, AN SSSR Press, 1962. 170 p.

Received: 25 June 2015.

УДК 621.311

# ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ ПОСТОВ СЕКЦИОНИРОВАНИЯ С НАКОПИТЕЛЯМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

# Черемисин Василий Титович,

д-р техн. наук, профессор, зав. каф. подвижного состава электрических ж.д. Электромеханического факультета Омского государственного университета путей сообщения, Россия, 644046, г. Омск, пр. Карла Маркса, 46. E-mail: Cheremisinvt@gmail.com

# Незевак Владислав Леонидович,

канд. техн. наук, доцент каф. электроснабжения ж.д. транспорта Электромеханического факультета Омского государственного университета путей сообщения, Россия, 644046, г. Омск, пр. Карла Маркса, 46. E-mail: NezevakWL@mail.ru

# Шатохин Андрей Петрович,

аспирант каф. подвижного состава электрических ж.д. Электромеханического факультета Омского государственного университета путей сообщения», Россия, 644046, г. Омск, пр. Карла Маркса, 46. E-mail: Shatohin ap@mail.ru

Повышение энергетической эффективности работы системы тягового электроснабжения направлено на достижение целевых показателей, обозначенных Энергетической стратегией ОАО «РЖД». Одной из основных задач, требующих решения, является повышение эффективности рекуперативного торможения на участках железных дорог, что может быть достигнуто обеспечением приема энергии рекуперации. Одним из возможных решений является размещение накопителя электрической энергии в системе тягового электроснабжения на посту секционирования, так как по ряду энергетических параметров именно на посту секционирования установка накопителя оказывается более эффективно по сравнению с размещением на тяговых подстанциях. Изучение основных режимов работы системы тягового электроснабжения в условиях применения рекуперативного торможения позволяет определить необходимые параметры и найти наиболее эффективные участки применения устройств.

**Цель работы:** оценка целесообразности и эффективности применения емкостных накопителей электрической энергии на постах секционирования железных дорог постоянного тока, в целях повышения эффективности применения рекуперативного торможения, а также повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения.

**Методы исследования:** имитационное моделирование тяговой нагрузки в системе тягового электроснабжения на основе экспериментальных данных, полученных с измерительных систем электровозов постоянного тока.

Результаты. Исследовано влияние емкостных накопителей энергии, расположенных на постах секционирования, на режимы работы системы тягового электроснабжения постоянного тока в условиях применения рекуперативного торможения. Моделирование работы накопителей энергии выполнено для одного из реальных участков железной дороги, содержащих несколько межподстанционных зон, на основе данных, полученных по результатам обработки тяговой нагрузки грузового поезда. Профиль пути рассматриваемого участка железной дороги содержит уклоны до десяти промилле, что обусловливает широкое применение рекуперативного торможения. Предложен алгоритм управления режимами работы накопителя электроэнергии на посту секционирования постоянного тока, основанный на измерениях уровня напряжения на шинах поста секционирования постоянного тока и шинах накопителя энергии. Рассмотрена схема управления накопителями энергии со встречным включением электронных ключей, обеспечивающая заряд накопителя энергии при применении поездов рекуперативного торможения и его разряд при минимальном напряжении на шинах поста секционирования при максимальной тяговой нагрузке. Показано, что применение накопителей энергии на посту секционирования постоянного тока позволяет повысить среднее напряжения на шинах смежных тяговых подстанций, сократить потери электроэнергии в тяговой сети, уровень тяговой нагрузки по вводу преобразовательного агрегата и суммарный расход электроэнергии, определяемый по присоединениям контактной сети тяговых подстанций. Выполнена оценка влияния накопителя на параметры работы системы тягового электроснабжения. Отмечены недостатки рассматриваемой схемы подключения накопителя электроэнергии к шинам поста секционирования постоянного тока, которые могут быть устранены в дальнейшем путем совершенствования схемы управления.

#### Ключевые слова:

Энергетическая эффективность, система тягового электроснабжения, пост секционирования, емкостной накопитель энергии, электроподвижной состав, расход электроэнергии.

Повышение энергетической эффективности перевозочного процесса на железнодорожном транспорте является одной из важнейших задач, требующих решения. Одним из основных направлений решения указанной задачи холдингом ОАО «РЖД» обозначено направление расширения применения рекуперативного торможения, позволяющего снизить расход электрической энергии на тягу поездов по тяговым подстанциям [1]. За последнее десятилетие объемы рекуперации на сети отечественных железных дорог практически удвоились и превысили 1,9 млрд кВт.ч по итогам 2014 г., однако потенциал повышения эффективности рекуперативного торможения и энергетической эффективности системы тягового электроснабжения далеко не исчерпан.

В настоящее время полигон железных дорог постоянного тока составляет около половины электрифицированных линий и именно на этих участках задача повышения эффективности энергии рекуперации стоит особо остро. Обусловлено это, в первую очередь, необходимостью создания условий для приема энергии рекуперации путем соответствующей организации движения поездов или путем размещения специальных приемников энергии рекуперации. Организация движения поездов позволяет максимально полно использовать энергию рекуперации путем такого взаимного расположения поездов, при котором прием энергии рекуперации поезда, находящегося в режиме рекуперативного торможения, обеспечивается поездами, находящимися на соответствующей межподстанционной зоне или смежных зонах в режиме тяги [2]. Расчеты показывают, что для каждого участка железной дороги и заданных размеров движения существует некоторое множество оптимальных нормативных графиков движения, позволяющих обеспечить минимальный уровень потребления электрической энергии на тягу поездов по тяговым подстанциям участка железной дороги. Следует отметить, что возможности изменения расписания следования поездов ограничены, что объясняется влиянием ряда факторов, например размерами движения на участке или количеством путей станции отправления. Указанные и подобные ограничения в целом ряде случаев не позволяют обеспечить прием энергии рекуперации в полном объеме. Исходя из этого, целесообразно рассмотреть вопрос размещения специальных приемников рекуперации в системе тягового электроснабжения. Известны случаи повышения напряжения в контактной сети выше 4000 В на участках с эксплуатацией электровозов серий ВЛ10 и ВЛ11 [3], приводящие к срабатыванию защиты от повышенного напряжения на электроподвижном составе и остановке поезда. Применение приемников энергии рекуперации в системе тягового электроснабжения позволяет обеспечить изменение напряжения в контактной сети в допустимых диапазонах. Указанные проблемы могут быть решены путем размещения в системе тягового электроснабжения (СТЭ) специальных приемников энергии рекуперации (инверторы или поглощающие устройства) [4, 5].

Появление различных типов промышленно выпускаемых образцов накопителей электроэнергии (НЭЭ), а также расширение номинального ряда их емкости позволяет рассмотреть использование НЭЭ в качестве приемника энергии рекуперации в системе тягового электроснабжения или на электроподвижном составе. Если размещение инверторов в системе тягового электроснабжения неразрывно связано с тяговыми подстанциями, то НЭЭ возможно размещать на объектах, непосредственно не связанных с внешней системой электроснабжения, например, на постах секционирования. Это позволяет в ряде случаев приблизить приемник энергии к местам с наибольшей частотой применения рекуперативного торможения или объемам рекуперации.

В настоящее время известно несколько типов НЭЭ – электрохимические, суперконденсаторы и кинетические [6], применение которых может рассматриваться в СТЭ [7–14]. Наиболее целесообразным в настоящее время представляется применение в СТЭ НЭЭ двух типов – емкостного (суперконденсатор) и электрохимического (аккумуляторная батарея), в силу ряда характеристик [15], или созданного на их основе гибридного накопителя энергии.

Применение накопителей энергии прошло апробацию на тяговых подстанциях Московского метрополитена [16, 17] и показало достаточно высокую энергетическую эффективность. В то же время следует учитывать, что применение НЭЭ на тяговых подстанциях содержит ряд недостатков, к которым можно отнести отсутствие эффектов разгрузки питающих линий тяговой подстанции, снижение потерь напряжения и мощности в тяговой сети, уменьшение нагрева проводов тяговой сети [18]. Указанных недостатков лишен случай размещения НЭЭ на электроподвижном составе, но он сопряжен со значительными инвестициями в модернизацию электроподвижного состава. Одним из предпочтительных вариантов размещения НЭЭ является пост секционирования, находящийся в границах ординат рекуперативного торможения, способствующий разгрузке питающих линий тяговых подстанций, снижению потерь напряжения и мощности в тяговой сети, уменьшению нагрева проводов тяговой сети. Как показывают расчеты, по сравнению с вариантом размещения НЭЭ на ТП, размещение накопителей на посту секционирования (ПС) по ряду энергетических параметров является более эффективным [19, 20].

Решение поставленной задачи на основе критерия минимума расхода электроэнергии по тяговым подстанциям позволяет получить вариант исполнения нормативного графика движения поездов, а также размещения приемников энергии рекуперации в системе тягового электроснабжения на основе планируемых размеров движения и имеющихся ограничений со стороны инфраструктуры. При решении задачи примем такой нормативный график движения поездов, который обеспечивает благоприятные условия для применения рекуперации, но не позволяет реализовать абсолютный уровень рекуперации. Реализация абсолютного уровня рекуперации в рассматриваемом случае будет осуществляться с помощью накопителя энергии таким образом, чтобы обеспечить снижение уровня электропотребления по тяговым подстанциям.

Рассмотрим задачу оценки эффективности размещения НЭЭ на посту секционирования одной из межподстанционных зон участка железной дороги. Для решения задачи проанализируем работу одного из участков железной дороги постоянного тока, состоящей из трех межподстанционных зон, на которых реализован узловой параллельный режим питания. Расчетная схема участка (рис. 1, *a*) содержит четыре тяговых подстанции (ТП1–ТП4), три поста секционирования (ПС1–ПС3) и единицу электроподвижного состава. К шинам поста секционирования ПС2 подключен накопитель электроэнергии емкостного типа (ЕНЭ) [21]. Схема замещения для расчетного участка представлена на рис. 1,  $\delta$ .

На расход электроэнергии на тягу оказывает влияние множество факторов, таких как: скорость движения, масса поезда, профиль пути, температура окружающего воздуха и др. [22, 23]. Для решения рассматриваемой задачи примем, что указанные факторы не подвержены изменениям и в данном аспекте решения задачи не учитываются. С целью оценки эффективности применения ЕНЭ на посту секционирования выполним имитационное моделирование движения поездов по рассматриваемому участку. Определим параметры схемы замещения, приняв следующие характеристики рассматриваемого участка. Тип контактной подвески по обоим путям участка - М-95+2МФ-100 с усиливающим проводом 2А-185; рельсовая сеть состоит из рельсов Р65 с межпутными соединителями. Каждая подстанция оборудована двумя 12-ти пульсовыми преобразовательными агрегатами, работающими параллельно, двумя понижающими трансформаторами типа ТДН-16000/110 и двумя преобразовательными трансформаторами типа ТРДП-16000/10ЖУ1. Схема выпрямительного

преобразователя — двенадцатипульсовая, последовательного типа. На выходе преобразователя установлен апериодический сглаживающий фильтр.

Определение основных параметров работы для рассматриваемого участка железной дороги основано на проведении тяговых расчетов поезда [24] и выполнении на их основе электрических расчетов. Наиболее точные результаты позволяют получить методы, учитывающие параметры тяговой нагрузки и взаимное расположение поездов на межподстанционных зонах [25–27].

Оценку эффективности применения ЕНЭ на посту секционирования ПС2 выполним по критерию сокращения суммарного расхода электрической энергии по тяговым подстанциям с учетом соблюдения обязательных требований к системе тягового электроснабжения и пропуску поездов (к минимальному и максимальному уровням напряжения в контактной сети, перегрузке трансформаторов и выпрямительных преобразователей подстанций, нагреву проводов тяговой сети). Энергетические параметры системы тягового электроснабжения оценим по среднему уровню напряжения в контактной сети и тяговой нагрузке подстанций.

Примем ряд допущений для определения параметров рассматриваемой схемы замещения (рис. 1, *б*):

 система напряжений внешнего электроснабжения является симметричной и синусоидальной, мгновенные значения напряжений на входе тяговых подстанций определяются по выражению (1):

$$U_{a,b,c} = U_m \sin(\omega t + \alpha_{a,b,c}), \tag{1}$$

где  $U_m$  – амплитудное значение напряжения;  $\alpha_{a,b,c}$  – фаза напряжений a, b, c соответственно.

 параметры понижающих и преобразовательных трансформаторов, а также выпрямитель-



Рис. 1. Расчетная схема участка

Fig. 1. Calculated scheme of the section

ных преобразователей на тяговых подстанциях являются идентичными и определяются по выражению (2):

$$Z_{\text{TIIi}} = Z_{\text{IIT}} + Z_{\text{IIpT}} + Z_{\text{BII}}, \qquad (2)$$

где  $Z_{\text{THi}}$  – входное сопротивление *i*-й подстанции, Ом;  $Z_{\text{IIT}}$  – сопротивление понижающего трансформатора, Ом;  $Z_{\text{IIpT}}$  – сопротивление преобразовательных трансформаторов;  $Z_{\text{BII}}$  – сопротивление выпрямителей, Ом.

 система внешнего электроснабжения обладает бесконечной мощностью исходя из условий (3):

$$S_{_{\text{K},3.}} \to \infty, \ Z_{_{\text{cl},2,3,4}} = 0,$$
 (3)

где  $S_{\text{к.з.}}$  – мощность короткого замыкания системы внешнего электроснабжения, кВт;  $Z_{\text{cl,2,3,4}}$  – сопротивление системы внешнего электроснабжения, Ом.

 посты секционирования ПС1–ПСЗ расположены на середине межподстанционных зон, при этом сопротивления элементов контактной сети определяются по выражению (4):

$$R_{\rm \tiny KC} = \frac{L_{\rm \tiny MII3}}{2} \cdot r_{\rm \tiny 0 \ \rm K.c}, \qquad (4)$$

где  $L_{\rm MII3}$  – длина межподстанционной зоны, км;  $r_{\rm 0k,c}$  – сопротивление 1 км контактной сети, Ом.

5) при движении электровоза от ТП2 до ПС2 сопротивления контактной и рельсовой сетей от ТП2 до электровоза и от электровоза до ПС2 изменяются линейно и для заданных параметров тяговой сети определяются по выражению (5):

$$R_{\rm \tiny Kc5,6;pc2,3} = 0,000374 \cdot t,\tag{5}$$

где *t* – время, прошедшее с начала моделирования, с.

6) скорость электровоза при движении по участку межподстанционной зоны принимается постоянной (6):

$$V_{a} = \text{const};$$
 (6)

 ток электровоза изменяется в соответствии с проведенными тяговыми расчетами или полученными в ходе измерений данными и является функцией времени (7):

$$I_{\mathfrak{s}} = f(t); \tag{7}$$

 напряжение на накопителе энергии на посту секционирования изменяется в зависимости от времени заряда/разряда и напряжения в контактной сети и является функцией нескольких переменных (8):

$$E_{\rm \tiny H} = f(U_{\rm \tiny KC}, t, I_{\rm \tiny pek}), \tag{8}$$

где  $U_{\rm \tiny RC}$  – напряжение в контактной сети в месте подключения поста секционирования, В; t – время заряда/разряда накопителя энергии, с;  $I_{\rm pek}$  – величина тока рекуперативного торможения, А.

Получение параметров тяговой нагрузки возможно двумя способами – путем проведения тяговых расчетов или путем получения данных измерений на электроподвижном составе. Для оценки эффективности применения ЕНЭ воспользуемся вторым способом – результатами измерений электрических параметров движения поезда с электровозом серии 2ЭС10 по участку железной дороги с параметрами (профиль пути, параметры системы тягового электроснабжения и др.), идентичными тем, которые приняты для схемы замещения (рис. 2).

Для заданных параметров схемы замещения и тяговой нагрузки выполним имитационное моделирование с помощью программного комплекса MatLab, позволяющего проводить исследования режимов работы системы тягового электроснабжения [28]. Имитационная модель для оценки эффективности применения ЕНЭ на посту секционирования, реализованная в MatLab, представлена на рис. 3. Она состоит из четырех блоков – тяговых подстанций (ТП 1-4), включает в себя тяговую сеть, представленную сопротивлениями контактной (R<sub>вс</sub>1-13) и рельсовой (R<sub>вс</sub>1-5) сетей. Сопротивления контактной сети R<sub>кс</sub>5-6 и сопротивления рельсовой сети R<sub>вс</sub>2-3 межподстанционной зоны представлены блоками переменных резисторов. Электровоз и ЕНЭ на ПС представлены блоками ЭПС и ЕНЭ. В блок ЭПС входит управляемый источник тока, позволяющий регулировать тяговую нагрузку в соответствии с полученными экспериментальными данными системы регистрации параметров движения электровоза 2ЭС10 (рис. 2), а также устройство защиты от повышенного напряжения, которое прерывает процесс рекуперативного торможения при достижении напряжения на токоприемнике выше 4000 В. Токи I<sub>tp</sub>1-4 и напряжения U<sub>tp</sub>1-4, измеряемые на всех тяговых подстанциях, электровозе (Ie, Ue) и ЕНЭ (In, Un), регистрируются блоками Scope 1 и Scope 2. В связи со значительным объемом вычислений для увеличения скорости расчетов была проведена дискретизация модели. Дискретизация выполнена методом Тастина (интегрирование методом трапеций с фиксированным шагом). Величина шага дискретизации составляет 0,2 мс.

Схема замещения тяговой подстанции рассматриваемого участка железной дороги в Matlab представлена на рис. 4 и включает в себя три источника переменного напряжения (фазы А, В, С), имитирующих трехфазную внешнюю сеть. Для моделирования понижающего и преобразовательных трансформаторов использовались блоки Three-Phase Transformer (Two Windings) и Three-Phase Transformer (Three Windings) соответственно. Для приведения параметров схемы замещения, понижающего трансформатора и двух преобразовательных, к базовым величинам использовалась методика, позволяющая производить данные расчеты по паспортным данным [29]. Моделирование 12-ти пульсовых выпрямителей выполнялось на основе 6-ти пульсовых блоков Universal Bridge.

Варианты подключения ЕНЭ к шинам поста секционирования и параметры тяговой нагрузки определяют схему подключения и схему заряда-разряда накопителя энергии. Для оценки эффективности применения ЕНЭ в системе тягового



Рис. 2. График изменения тяговой нагрузки при следовании поезда







Fig. 3. Simulator of the electric traction system



**Рис. 4.** Схема замещения тяговой подстанции в MatLab

Fig. 4. Equivalent circuit of the traction substation in MatLab

электроснабжения рассмотрим схему подключения ЕНЭ с помощью встречно включенных IGBT транзисторов [21]. Схема замещения представленной модели в MatLab примет вид, приведенный на рис. 5. Схема состоит из блоков IGBT/Diode K1 и K2, моделирующих IGBT-транзисторы и предназначенных для управления режимами работы ЕНЭ. Накопитель моделируется блоком Cn, состоящим из конденсаторов, позволяющих изменять суммарную емкость.

Управление режимами работы ЕНЭ основано на измерениях уровня напряжения на шинах поста секционирования и накопителе. Управление режимами работы реализуется таким образом, чтобы обеспечить переход в режим заряда ЕНЭ при повышении номинального уровня напряжения (при рекуперативном торможении) и переход в режим разряда при падении уровня напряжения на шинах поста секционирования до минимального значения. Результаты измерений используются в системе управления устройством по заданному алгоритму. В основу алгоритма работы (рис. 6) рассматриваемой схемы положены измерения тока и напряжений с помощью датчиков тока и напряжения в контактной сети в точке присоединения ПС, а также на емкостном накопителе. На основе измерений указанных величин осуществляется переключение транзисторных ключей для реализации процесса заряда, разряда или перехода в режим ожидания.



**Рис. 5.** Схема подключения ЕНЭ в MatLab **Fig. 5.** Connection scheme of the CESU in MatLab



Рис. 6. Алгоритм работы ЕНЭ на посту секционирования

Fig. 6. Mechanism of the CESU operation on the sectioning post

Работа ЕНЭ на посту секционирования осуществляется следующим образом. В начальный момент времени определяется готовность устройства к работе, затем – уровень напряжения на шинах ПС. При повышении напряжения на шинах поста секционирования U<sub>пс</sub> до уровня U<sub>макс</sub>, соответствующего режиму рекуперативного торможения поезда, и напряжении на накопителе U<sub>ЕНЭ</sub> ниже максимально возможного уровня U<sub>зар</sub>, соответствующего полному заряду устройства, ЕНЭ переходит в режим заряда. При понижении напряжения на шинах поста секционирования  $U_{\rm nc}$  до уровня  $U_{\mbox{\tiny MHH}}$  и напряжении на накопителе  $U_{\mbox{\tiny EH} \mbox{\tiny 9}}$  выше уровня  $U_{\text{раз}}$ , обеспечивающего разряд, ЕНЭ переходит в режим разряда в контактную сеть. При отсутствии условий для перехода ЕНЭ в режим разряда или заряда накопитель на посту секционирования находится в режиме ожидания. Алгоритм работы предусматривает прекращение работы ЕНЭ в аварийных режимах.

Обозначившиеся перспективы развития систем тягового электроснабжения в направлении «smart grid» позволяют рассмотреть построение алгоритма работы накопителя электроэнергии на посту секционирования с учетом уровней напряжения и тяговых нагрузок на шинах тяговых подстанций. В этом случае использование накопителей позволит регулировать напряжение не только на посту секционирования, но и на тяговых подстанциях.

Имитационная модель позволяет получить результаты для режимов разряда и заряда ЕНЭ, когда электроподвижной состав находится в режимах тяги и рекуперативного торможения соответственно. В модели учтены требования к защите электроподвижного состава, в соответствии с которыми обеспечивается переход из режима рекуперации в режим торможения при увеличении напряжения на токоприемнике до 4000 В. Графики изменения напряжения, тока на ТП2 и ЭПС при разряде ЕНЭ, а также при его последующем заряде представлены на рис. 7. Из рисунка видно, что при переходе электроподвижного состава из режима тяги в режим рекуперативного торможения начинает повышаться напряжение на шинах тяговой подстанции U'<sub>тп2</sub> (в отличие от уровня U<sub>тп2</sub>, наблюдаемого при отключенном ЕНЭ на посту секционирования) и на токоприемнике электровоза U'<sub>эпс</sub> (в отличие от уровня U<sub>эпс</sub>, наблюдаемого при отключенном ЕНЭ на посту секционирования). Аналогичным образом изменяются токи присоединений тяговой подстанции ТП2 и электроподвижного состава. При достижении напряжения на токоприемнике уровня 4000 В или полном заряде ЕНЭ происходит прекращение процесса заряда.

Графики изменения напряжения и тока на ЕНЭ, установленном на посту секционирования ПС2, представлены на рис. 8. Зона 1, в которой происходит падение напряжения на токоприемни-



**Рис. 7.** Графики изменения напряжения и тока на тяговой подстанции ТП2 и электроподвижном составе при разряде (a, б) и при последующем заряде ЕНЭ (b, r)



ке ЭПС с 3750 до 3250 В, соответствует режиму разряда ЕНЭ на посту секционирования ПС2. При переходе в режим рекуперативного торможения происходит увеличение напряжения на шинах поста секционирования ПС2 и ЕНЭ переходит в режим заряда (зона 2). В зоне 2 наблюдается два цикла заряда ЕНЭ, что объясняется ограниченной емкостью накопителя. Повторное применение рекуперативного торможения позволяет возобновить процесс заряда ЕНЭ.

Результаты имитационного моделирования для рассмотренного участка железной дороги с накопителем энергии на посту секционирования ПС2 представлены в таблице. Применение НЭЭ на ПС позволяет улучшить основные энергетические характеристики режима работы системы тягового электроснабжения. В частности, установлено, что среднее напряжение за рассматриваемый интервал времени на присоединениях контактной сети смежных подстанции можно увеличить на 3 %, а средний уровень тяговой нагрузки снизить на 2 %. Предлагаемый вариант применения ЕНЭ для рассматриваемого случая позволяет сократить потери в контактной сети на 0,85 % и суммарный расход электроэнергии на 1,71 %.



его разряде и последующем заряде

*Fig. 8.* Diagrams of voltage and current modification of the CE-SU at its discharge and following charge

Следует отметить, что рассматриваемая имитационная модель участка железной дороги (рис. 3) для анализа протяженных участков может быть расширена до границ подразделения, железной дороги или полигонов обращения поездов в грузовом и пассажирском движении. В этом случае схема замещения должна быть дополнена необходимым количеством элементов системы тягового электроснабжения, а также необходимым количеством электроподвижного состава различного типа в соответствии с заданными размерами движения.

В ходе имитационного моделирования выявлен ряд недостатков схемы подключения накопителя энергии на посту секционирования, к которым следует отнести невозможность как дополнительного подзаряда накопителя энергии малыми токами в моменты времени, когда нагрузка в контактной сети отсутствует или мала, так и изменения работы накопителя энергии в зависимости от уровня тяговой нагрузки. Эти и другие недостатки могут быть устранены совершенствованием схемы подключения накопителя энергии к посту секционирования.

Таблица.	Результаты имитационного моделирования
Table.	Results of simulation

			Напря	жение			Изме	нение
	Pacyor	и <b>и Вт</b> •ч	на токо	прием-			тока и на-	
	Consur	nntion	ник	e, B	Ток	к, А пряжения, %		ния, %
e	kw	/•h	Voltage	e at the	Curre	ent, A	Char	ige of
НИ	KVV•11		current collec-				current and	
le le			tor	, V		voltage, %		ge, %
Наимено Titl	Без ЕНЭ Without CESU	C EHƏ With CESU	U <sub>cpen</sub> без EH∋ U <sub>cpen</sub> without CESU	U <sub>cpen</sub> c EH <del>)</del> U <sub>cpen</sub> with CESU	। I <sub>cpen</sub> Without CESU	l <sub>cpen</sub> c EH∋ I <sub>cpen</sub> with CESU	U	I
ТП1	208,02	205,70	3523,0	3532,2	270,7	267,6	0,26	-1,15
ТΠ2	406,50	402,33	3388,0	3476,7	548,4	542,3	2,62	-1,11
ТПЗ	154,76	149,53	3427,7	3546,4	199,4	192,6	3,46	-3,44
ТΠ4	77,34	74,61	3458,5	3566,1	98,5	95,0	3,11	-3,55
ЭПС	781,45	775,38	3377,5	3388,3	1117,0	1108,7	0,32	-0,74

Результаты моделирования взаимодействия электроподвижного состава и системы тягового электроснабжения на примере одного из эксплуатационных участков железной дороги постоянного тока показали, что применение накопителей энергии на посту секционирования позволяет сократить уровень электропотребления по тяговым подстанциям за счет повышения эффективности рекуперативного торможения на величину 1,7 %. Одновременно с этим применение накопителей позволяет увеличить средний уровень напряжения на токоприемнике электроподвижного состава и снизить средний ток тяговой нагрузки тяговых подстанций, что способствует увеличению пропускной и провозной способности участка железной дороги. Оценка влияния энергоемкости и режимов работы накопителей электроэнергии на энергетическую эффективность системы тягового электроснабжения в условиях различных профилей пути, скоростей движения и масс поездов, а также в условиях построения интеллектуальных систем тягового электроснабжения требует проведения дополнительных исследований.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- . Распоряжение ОАО «РЖД» от 15 декабря 2011 года № 2718р. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года. – М., 2011.
- Сидорова Н.Н., Третинников О.В., Феоктистов В.П. Повышение эффективности рекуперативного торможения в электрической тяге // Наука и техника транспорта. –2015. № 1. С. 19–22.
- Влияние рекуперативного торможения на систему тягового электроснабжения / В.Т. Черемисин, А.С. Вильгельм, В.А. Кващук, В.Л. Незевак // Локомотив. – 2013. – № 8. С. 5-8.
- Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи. М.: Транспорт, 1999. – 464 с.
- Соколов С.Д. Полупроводниковые преобразовательные агрегаты тяговых подстанций. – М.: Транспорт, 1979. – 264 с.
- Астахов Ю.Н. Накопители энергии в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1989. – 159 с.
- Шатохин А.П. Перспективные места установки накопителей электрической энергии // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: матер. 2-й Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием.-Омск, 2014. – С. 162–168.
- Nezevak V.L., Cheremisin V.T., Shatohin A.P. Evaluation of the Energy Efficiency of Energy Storage for Electric Rolling Stock of Railways DC // International Journal of Advanced Railway. – 2013. – V. 1. – № 2. – P. 53–56.
- Denton T. Automobile Electrical and Electronic Systems. L.: Routledge, 2010. - 463 p.
- Williams M. Rice University's James Tour Group creates singlesurface material for energy storage, electronics // Nature Communications. – 2012. – № 3. URL: http://news.rice.edu/2012/11/27/james-bond-a-graphenenanotube-hybrid-2/#sthash.9S22r6jx.dpuf (дата обращения: 10.04.2015).
- Yan G., Li J., Zhang Y., Gao F., Kang F. Electrochemical polymerization and energy storage for poly [Ni (salen)] as supercapacitor electrode material // Journal of Physical Chemistry. 2014. V. 118. № 19. P. 9911-9917.
- Sevilla M., Mokaya R. Energy storage applications of activated carbons: supercapacitors and hydrogen storage // Energy & Environmental Science. - 2014. - V. 7. - № 4. - P. 1250-1280.
- Hybrid energy storage system based on supercapacitors and LI-ION Batteries / A. Zhuk, K. Denschikov, V. Fortov, A. Sheindlin, W. Wilczynski // Journal of Applied Electrochemistry. – 2014. – V. 44. – № 4. – P. 543–550.
- Zherlitsyn A.G., Kanaev G.G. A gigawatt generator with an inductive energy storage discharge // Instruments and Experimental Techniques. - 2013. - V. 56. - № 3. - P. 287-288.
- Бут А.Д. Накопители энергии. М.: Энергоатомиздат, 1991. 400 с.
- Стационарная система аккумулирования энергии рекуперации электроподвижного состава метрополитена на базе емкост-

ных накопителей энергии / Ю.А. Бродский, А.И. Подаруев, В.Н. Пупынин, М.В. Шевелюгин // Электротехника. – 2008. – № 7. – С. 38–41.

- Бычкова М.П. Система накопителей электроэнергии для повышения энергоэффективности в метро // Энергосовет. – 2011. – № 3. URL: http://www.energosovet.ru/bul\_stat.php?idd=185 (дата обращения: 15.04.2015).
- Незевак В.Л., Вильгельм А.С. К вопросу о выборе накопителя на участках постоянного тока с применением рекуперативного торможения // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: матер. науч.практ. конф. – Омск, 2013. – С. 30–36.
- Незевак В.Л., Никифоров М.М., Черемисин В.Т. Выбор мест установки накопителей электрической энергии на полигоне постоянного тока железнодорожного транспорта по критерию энергоэффективности // Наука и транспорт. Модернизация железнодорожного транспорта. – 2013. – № 2 (6). – С. 14–18.
- Вильгельм А.С., Незевак В.Л., Шатохин А.П. Сравнительная эффективность вариантов использования энергии рекуперации на железных дорогах постоянного тока // Наука и образование транспорту: матер. VI Междунар. науч.-практ. конф. – Самара, 2013. – С. 243–246.
- Пост секционирования постоянного тока с емкостным накопителем энергии: пат. Рос. Федерация № 147814; завл. 02.04.2014; опубл. 20.11.2014, Бюл. № 32. – 2 с.
- 22. Сидорова Е.А. Разработка системы нормирования расхода электроэнергии на тягу поездов на основе исследования статистических закономерностей: дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 1991. – 198 с.
- 23. Давыдов А.И., Никифоров М.М. Общие принципы сравнительного анализа эффективности использования электроэнергии на тягу поездов по участкам железных дорог // Наука и образование транспорту. 2013. Т. 1. № 1. С. 237–240.
- Правила тяговых расчетов для поездной работы / под ред. А.Н. Долганов. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
- Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
- 26. Вильгельм А.С., Гутников В.И., Никифоров М.М. Апробация расчетной модели системы тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока для оценки потенциала энергоэффективности рекуперативного торможения // Известия Транссиба. – 2014. – № 1 (17). – С. 50–57.
- Комяков А.А., Вильгельм А.С., Незевак В.Л. Совершенствование метода расчета системы тягового электроснабжения переменного тока // Известия Транссиба. 2014. № 3 (19). С. 54–65.
- Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems, Simulink. – СПб.: ДМК Пресс, 2008. – 288 с.
- Борисов П.А., Томасов В.С. Расчет и моделирование выпрямителей. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2009. – 169 с.

Поступила 19.05.2015 г.

UDC 621.311

# INCREASE OF ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC TRACTION SYSTEM IN OPERATING CONDITION OF SECTIONING POSTS WITH ELECTRIC ENERGY STORAGE UNITS

# Vasily T. Cheremisin,

Omsk State Transport University, 46, Karl Marx Avenue, Omsk, 644046, Russia. E-mail: Cheremisinvt@gmail.com

# Vladislav L. Nazevak,

Omsk State Transport University, 46, Karl Marx Avenue, Omsk, 644046, Russia. E-mail: NezevakWL@mail.ru

# Andrey P. Shatokhin,

Omsk State Transport University, 46, Karl Marx Avenue, Omsk, 644046, Russia. E-mail: Shatohin ap@mail.ru

The increase of energy efficiency of the electric traction system is directed to achieving the target indicators, denoted by the Energy strategy of the OS «RZD». One of the basic problems, which must be solved, is the increase of efficiency of the regenerative braking on the railway sections. This could be achieved by receiving regeneration energy. One of the possible decisions is the disposal of the electric energy storage unit in the electric traction system on the sectioning post. For some energy parameters, the installation of storage unit on the sectioning post is more effective in comparison with its location on the traction substations. The analysis of the basic methods of the electric traction system operation when the regenerative braking is applied allows determining the required parameters and finding more effective areas for using the device.

**The aim** of the research is to evaluate the expediency and the efficiency of applying the capacitive energy storage units on the railway posts of the DC sectioning to increase the efficiency of using the regenerative braking as well as to increase the energy efficiency of the electric traction system.

**Research methods:** the simulation modeling of the traction capacity in the electric traction system based on the experimental date, obtained from the measuring system of the DC electric locomotive.

**Results.** The authors have analyzed the influence of the capacitive energy storage units, located on the sectioning posts on the operation modes of the DC electric traction system when the regenerative braking is applied. The electric energy storage unit operation was modeled for one of the actual area of the railroad with several areas between substations, on the base of the data, obtained by the results of processing the goods train traction load. The cross-section of a road includes gradients up to 10 ppm, that causes the wide use of the regenerative braking. The authors proposed the algorithm of controlling the operating mode of the electric energy storage unit on the post of the DC sectioning, which is based on measuring voltage level on the wires of the post of the DC sectioning and on the wires of the electric energy storage unit; considered the diagram of controlling the energy storage units with the counter turning on of the election keys, which provides the energy storage charge unit when using the trains with regenerative braking and its discharge at minimal voltage in the wires of the sectioning post by the maximal traction load. It was shown, that the use of the electric energy storage units on the post of the DC sectioning allows increasing the average voltage on the wires of the adjacent traction substations, reducing electric energy losses in the traction system, the level of the traction load of the converting unit input and the total electric power consumption, determined by the connections of the contact network of the traction substations. The authors estimated the influence of the energy storage unit on the working parameters of the electric traction system. The paper mentions the defects of the considered diagram of the energy storage unit connection to the wires of the DC sectioning post. The defects can be removed by improving the control diagram.

#### Key words:

Energy efficiency, electric traction system, sectioning post, capacitive energy storage unit, electric rolling train.

### REFERENCES

- Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 15 dekabrya 2011 goda № 2718r. Energeticheskaya strategiya holdinga «Rossiyskie zheleznye dorogi» na period do 2015 goda i na perspektivu do 2030 goda [Instruction of OS «RZhD» of 15 December 2011 no. 2718r. Energy strategy of the holding company «Russian Railways» for 2015 and in outlook till 2030]. Moscow, 2011.
- Sidorova N.N., Tretinnikov O.V., Feoktistov V.P. Povyshenie effektivnosti rekuperativnogo tormozheniya v elektricheskoy tyage [The increase of of the regenerative braking efficiency in electric traction]. *The science and technology of transport*, 2015, vol. 113, no. 1, pp. 19–22.
- Cheremisin V.T., Vilgelm A.S., Kvashchuk V.A., Nezevak V.L. Vliyanie rekuperativnogo tormozheniya na sistemu tyagovogo elektrosnabzheniya [The influence of the regenerative braking on the electric traction system]. *The locomotive*, 2013, no. 8, pp. 5–8.
- 4. Burkov A.T. *Elektronnaya tekhnika i preobrazovateli* [Electronics and converters]. Moscow, Transport Publ., 1999. 464 p.

- Sokolov S.D. Poluprovodnikovye preobrazovatelnye agregaty tyagovykh podstantsy [Semiconducting converting units of the traction substations]. Moscow, Transport Publ., 1979. 264 p.
- Astakhov Yu.N. Nakopiteli energii v elektricheskikh sistemakh [Energy storage units in the electrical systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989. 159 p.
- 7. Shatokhin A.P. Perspektivnye mesta ustanovki nakopiteley elektricheskoy energii [The perspective sites of installing the electric energy storage units]. Ekspluatatsionnaya nadezhnost lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tyagi poezdov. Materialy 2 Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem [Materials of the 2<sup>nd</sup> All-Russian theoretical and practical conference with the international partnership. The operating reliability of the locomotive park and the increase of the train traction efficiency]. Omsk. pp. 162–168.
- 8. Nezevak V.L., Cheremisin V.T., Shatokhin A.P. Evaluation of the energy efficiency of the energy storage unit for the electric rolling stock of the DC railways. *International journal of advanced railways*, 2013, vol. 1, no. 2, pp. 53–56.

- 9. Denton T. Automobile electrical and electronic systems. London, Routledge, 2010. 463 p.
- Williams M. Rice University's James Tour Group creates singlesurface material for energy storage, electronics. Nature Communications, 2012, no. 3. Available at: http://news.rice.edu/ 2012/11/27/james-bond-a-graphenenanotube-hybrid-2/#sthash.9S22r6jx.dpuf (accessed 10 April 2015).
- Yan G., Li J., Zhang Y., Gao F., Kang F. Electrochemical polymerization and energy storage for poly [Ni (salen)] as supercapacitor electrode material. *Journal of Physical Chemistry*, 2014, vol. 118, no. 19, pp. 9911–9917.
- Sevilla M., Mokaya R. Energy storage applications of activated carbons: supercapacitors and hydrogen storage. *Energy & Envi*ronmental Science, 2014, vol. 7, no. 4, pp. 1250–1280.
- Zhuk A., Denschikov K., Fortov V., Sheindlin A., Wilczynski W. Hybrid energy storage system based on supercapacitors and LI-ION Batteries. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2014, vol. 44, no. 4, pp. 543-550.
- Zherlitsyn A.G., Kanaev G.G. A gigawatt generator with an inductive energy storage discharge. *Instruments and Experimental Techniques*, 2013, vol. 56, no. 3, pp. 287–288.
- But A.D. Nakopiteli energii [Energy storage units]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 400 p.
- 16. Brodskiy Yu.A., Podaruev A.I., Pupynin V.N., Shevelyugin M.V. Statsionarnaya sistema akkumulirovaniya energii rekuperatsii elektropodvizhnogo sostava metropolitena na baze emkostnykh nakopiteley energii [Stationary system of regenerative energy accumulation in subway electric rolling train based on the capacitive energy storage units]. *The electrical engineering*, 2008, vol. 64, no. 7, pp. 38–41.
- 17. Sistema nakopiteley elektroenergii dlya povysheniya energoeffektivnosti v metro [System of electric energy storage units for increasing energy efficiency in the subway]. Available at: http://www.energosovet.ru/bul\_stat.php? idd=185 (accessed 15 April 2015).
- 18. Nezevak V.L., Vilgelm A.S. K voprosu o vybore nakopitelya na uchastkakh postoyannogo toka s primeneniem rekuperativnogo tormozheniya [On the issue of selecting the storage unit on the DC areas applying the regenerative braking]. *Innovatsionnye proekty i novye tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte. Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Materials of the theoretical and practical conference. Innovative projects and new technologies in education, industry and transport]. Omsk. pp. 30–36.
- 19. Nezevak V.L., Nikiforov M.M., Cheremisin V.T. Vybor mest ustanovki nakopiteley elektricheskoy energii na poligone postoyannogo toka zheleznodorozhnogo transporta po kriteriyu energoeffektivnosti [The choise of the installing the electric energy storage units on the railway transport ground according to the efficient energy use criterion]. Nauka i transport. Modernizatsiya zheleznodorozhnogo transporta, 2013, no. 2 (6), pp. 14–18.

- 20. Vilgelm A.S., Nezevak V.L., Shatokhin A.P. Sravnitelnaya effektivnost variantov ispolzovaniya energii rekuperatsii na zheleznykh dorogakh postoyannogo toka [The comparative efficiency of the variants of using the recuperation energy on the DC railways]. Nauka i obrazovanie transportu. Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Materials of the VI<sup>th</sup> International theoretical and practical conference. Science and education for transport]. Samara, 2013. pp. 243–246.
- Cheremisin V.T., Nezevak V.L., Shatokhin A.P. Post sektsionirovaniya postoyannogo toka s emkostnym nakopitelem energii [The post of DC sectioning with the capacitive energy storage unit]. Patent RF, no. 147814, 2014.
- 22. Sidorova E.A. Razrabotka sistemy normirovaniya raskhoda elektroenergii na tyagu poezdov na osnove issledovaniya statisticheskikh zakonomernostey. Dis. Kand. nauk [The development of the systems for rating power consumption for train traction based on the research of the statistical pattern]. Omsk, 1991. 198 p.
- 23. Davydov A.I., Nikiforov M.M. Obshchie printsipy sravnitelnogo analiza effektivnosti ispolzovaniya elektroenergii na tyagu poezdov po uchastkam zheleznykh dorog [General principles of the comparative analysis of using electrical energy for train traction on the railway sections]. Science and transport education, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 237–240.
- Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty [The rules of traction calculation for train operation]. Ed. by A.N. Dolganova. Moscow, Transport Publ., 1985. 287 p.
- Markvardt K.G. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [The electric power supply of the electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1982. 528 p.
- 26. Vilgelm A.S., Gutnikov V.I., Nikiforov M.M. Aprobatsiya raschetnoy modeli sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog postoyannogo toka dlya otsenki potentsiala energoeffektivnosti rekuperativnogo tormozheniya [Approbation of the design model of DC railroad electric traction system for estimating the potential of the regenerative braking energy efficiency]. *Proceedings of the TRANS-Siberian railway*, 2014, vol. 154, no. 1, pp. 50–57.
- 27. Komyakov A.A., Vilgelm A.S., Nezevak V.L. Sovershenstvovanie metoda rascheta sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka [Improvement of the design method of the DC electric traction system]. *Proceedings of the TRANS-Siberian railway*, 2014, vol. 154, no. 3, pp. 54–65.
- Chernykh I.V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v Matlab, SimPowerSystems, Simulink [Modeling of the electrotechnical devices in Matlab, SimPowerSystems, Simulink]. St. Petersburg, DMK Press, 2008. 288 p.
- Borisov P.A., Tomasov V.S. Raschet i modelirovanie vypryamiteley [Calculation and modeling of the rectifiers]. St. Petersburg, ITMO University Press, 2009. 169 p.

Received: 19 May 2015.

УДК 537.52; 533.9

# ДЕСТРУКЦИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ГАЗОВОЙ И ЖИДКОЙ СРЕДАХ В ПЛАЗМЕ СВЧ-РАЗРЯДА

# Жерлицын Алексей Григорьевич,

канд. тех. наук, инженер-проектировщик 2 категории лаборатории № 42 Физико-технического института ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: zherl@tpu.ru

### Шиян Владимир Петрович,

канд. физ-мат. наук, инженер проектировщик 2 категории лаборатории № 42 Физико-техеического института ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: schijan@tpu.ru.

# Шиян Людмила Николаевна,

канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры общей и неорганической химии Института физики высоких технологий ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: lshiyan@rambler.ru

# Магомадова Седа Османовна,

магистрант кафедры общей и неорганической химии Института физики высоких технологий ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: valishevskaya s@mail.ru.

Представлены результаты экспериментального исследования деструкции органических соединений в газовых и жидких средах с использованием плазмы СВЧ-разряда атмосферного давления. Разработан СВЧ-плазмотрон волноводного типа на частоте 2,45 ГГц, мощностью до3 кВт, используемый в качестве источника плазмы разряда. В качестве газовой среды использовался углеводородный газ, жидкой средой были водные растворы метиленового голубого и более сложные органические соединение в виде гуминовых веществ. Исследования выполнены для продвижения разработанного плазмотрона в технологиях утилизации отходов, очистки жидких сред от вредных веществ, получении новых материалов и модификации поверхности материалов. **Цель работы:** исследовать процесс деструкции углеводородного газа и растворов метиленового голубого и гуминовых веществ при взаимодействии с плазмой СВЧ-разряда при атмосферном давлении.

Методы исследования: оптическая спектроскопия, фотоколориметрия, аналитическая химия, рН-метрия.

**Результаты.** В результате деструкции молекул природного газа в плазме CB4-разряда обнаружены такие вещества, как водород, ацетилен, этилен, наноструктурированный углеродный материал. Показано, что добавление в природный газ азота повышает степень деструкции молекул природного газа и обеспечивает стабильную работу плазмотрона, при этом степень деструкции достигает 70 %. В экспериментах по деструкции органических соединений водных растворов в качестве плазмообразующих газов были использованы воздух и аргон. С помощью обратимого окислительно-восстановительного индикатора метиленового голубого показано, что процесс деструкции органических веществ в плазме CB4-разряда основан на протекании окислительно-восстановительных реакций. Установлено, что наибольшая эффективность деструкции метиленового голубого в растворе происходит при использовании плазмообразующего газа воздуха, что приводит к снижению интенсивности поглощения в видимой области спектра при 590 нм. Предложен механизм деструкции исследуемых органических соединений в водных растворие разов раз водных раствора в качество польцения в видимой области спектра при 590 нм. Предложен механизм деструкции исследуемых органических соединений в водных растворах рах при воздействии плазмо СВЧ-разряда.

#### Ключевые слова:

Деструкция, органические соединения, плазма сверхвысокочастотного (СВЧ) разряда, СВЧ-плазмотрон, углеводородный газ, водный раствор, метиленовый голубой, гуминовые вещества.

### Введение

Известно, что газовый разряд создает химически активную плазму, способную обеспечить необходимые условия для деструкции органических соединений и синтезировать уникальные структуры. Это находит применение при разработке новых технологий по утилизации отходов [1], очистке продуктов от вредных веществ [2–4], получении новых материалов [5, 6], модификации поверхности материалов [7, 8] и т. д.

В последнее время интенсивно исследуются возможности применения СВЧ-разряда в плазмохимических процессах. Выбор такого типа разряда обоснован протеканием плазмохимических реакций с высокой энергетической эффективностью, обусловленной колебательным возбуждением молекул вещества в неравновесной плазме СВЧ-разряда [9, 10]. Это представляет интерес в первую очередь для плазмохимических процессов, протекающих с участием электронно-возбужденных частиц и продуктов деструкции органических веществ.

Целью работы является исследование процесса деструкции углеводородного газа и растворов метиленового голубого и гуминовых веществ при взаимодействии с плазмой СВЧ-разряда при атмосферном давлении.

#### Экспериментальная установка

Основным элементом экспериментальной установки является СВЧ-плазмотрон. Схема плазмотрона представлена на рис. 1.

Конструктивно плазмотрон представляет собой волноводно-коаксиальный переход, состоящий из прямоугольного волновода – 1 и коаксиальной линии с полым внутренним проводником – 2 и внешним проводником – 3, образующим разрядную камеру – 4. Для поддержания стабильного СВЧ-разряда в плазмотроне предусмотрена активная система инициирования и поддержания разряда, подробно описанная в работе [11]. Ввод в разрядную камеру плазмотрона углеводородного газа или водного раствора осуществляется по трубопроводу 5 через сопло – 6. Питание плазмотрона подается от магнетрона - 7 с выходной регулируемой мощностью до 2 кВт в непрерывном режиме с рабочей частотой 2,45 ГГц. Для защиты магнетрона от пробоя используется ферритовый циркулятор - 8. При работе с водными растворами плазмообразующий газ в плазмотрон подается через патрубок – 9. Конструкция сопла – 6 позволяет распылять поступающий по трубопроводу – 5 водный раствор потоком газа подобно эжектору.



- Рис. 1. Схема СВЧ плазмотрона: 1 прямоугольный волновод; 2 – внутренний проводник коаксиальной линии; 3 – внешний проводник коаксиальной линии; 4 – разрядная камера; 5 – трубопровод; 6 – сопло; 7 – магнетрон; 8 – ферритовый циркулятор; 9 – патрубок
- **Fig. 1.** Scheme of microwave plasma generator: 1 is the rectangular waveguide; 2 is the inner conductor of coaxial line; 3 is the outer conductor of coaxial line; 4 is the discharge chamber; 5 is the pipeline; 6 is the nozzle; 7 is the magnetron; 8 is the ferrite circulator; 9 is the nipple

Экспериментальная установка работает следующим образом. При использовании углеводородного газа включается система инициирования СВЧ разряда в разрядной камере – 4. Затем по трубопроводу – 5 через сопло – 6 в разрядную камеру подается углеводородный газ и включается магнетрон – 7. По волноводу – 1 через коаксиально-волноводный переход СВЧ энергия от магнетрона – 7 попадает в разрядную камеру – 4. В зоне сопла – 6 из-за прошедших и отраженных электромагнитных волн происходит увеличение напряженности

электрического поля до пробивного значения. В результате зажигается СВЧ разряд в атмосфере углеводородного газа и образуется неравновесная низкотемпературная плазма. Процесс образования плазмы происходит при атмосферном давлении углеводородного газа при отсутствии кислорода.

В случае работы плазмотрона с водными растворами раствор в разрядную камеру подается по трубопроводу – 5 через сопло – 6, а плазмообразующий газ – через патрубок – 9. В экспериментах в качестве плазмообразующего газа использовали воздух и аргон. Образование плазмы СВЧ разряда происходит в среде, содержащей воздух и частицы распыленного водного раствора.

Конструкция установки не позволяет проводить длительное взаимодействие раствора с плазмой СВЧ разряда, поэтому реализуется цикличное воздействие плазмы. Под цикличностью подразумевается многократный контакт взаимодействия исследуемого раствора с плазмой СВЧ-разряда. Производительность цикла зависит от пропускной способности полого внутреннего проводника, и в данной установке составляет (2 л/ч).

# Деструкция углеводородного газа в плазме СВЧ-разряда

Эксперименты проведены при расходе углеводородного газа от 0,4 до 1 м<sup>3</sup>/ч, а уровень СВЧмощности, вкладываемой в разряд, изменяли от 0,8 до 2 кВт. Деструкцию молекулярных соединений контролировали по выходу газов с использованием хроматографического анализа. В табл. 1 представлен компонентный состав исходного углеводородного газа.

Таблица 1. Компонентный состав исходного углеводородного газа

Table 1.	Component	composition	of original h	vdrocarbon gas
				,

Компонент/Component	Концентрация, % Concen- tration, %
Метан/Methane	93,554
Этан/Ethane	3,858
Пропан/Propane	1,458
Изо-бутан/Iso-butane	0,291
Бутан/Butane	0,262
Изо-бутилен/Iso-butylene	0,002
Изо-пентан/Iso-pentan	0,027
Пентан/Pentan	0,013
Диоксид углерода/Carbon dioxide	0,536

В табл. 2 представлен компонентный состав углеводородного газа, прошедшего через СВЧ-разряд.

Из табл. 1 и 2 следует, что в плазме СВЧ разряда происходит деструкция молекул метана и С<sup>2+</sup> углеводородов с образованием новых соединений, таких как этилен, ацетилен, водород. Степень деструкции газа в экспериментах оценивали по объемному содержанию метана до и после обработки в плазме СВЧ-разряда. Свободный углерод после разряда выпадает в виде твердых частиц углеродного материала. Анализ фазового состава твердого материала, выполненный с помощью дифрактометра XRD-6000 (Томский материаловедческий центр коллективного пользования ТГУ), показывает, что полученный материал состоит из углеродных нанотрубок с размерами частиц от единиц до нескольких десятков нанометров.

**Таблица 2.** Компонентный состав углеводородного газа после его прохождения через разряд

 Table 2.
 Component composition of hydrocarbon gas after discharge

Компонент/Component	Концентрация, % Concentration, %		
Метан/Methane	36,185		
Этан/Ethane	0,501		
Этилен/Ethylene	1,307		
Пропан/Propane	0,226		
Ацетилен/Acetylene	2,536		
Изо-бутан/Iso-butane	0,068		
Бутан/Butane	0,061		
Изо-бутилен/Iso-butylene	0,000		
Цис-бутен 2/Cis-butene 2	0,003		
Изо-пентан/Iso-pentan	0,003		
Пентан/Pentan	0,003		
Водород/Hydrogen	58,727		
Диоксид углерода/Carbon dioxide	0,376		

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости степени деструкции молекул газа от уровня СВЧ мощности, вводимой в разряд. В качестве параметра здесь взят расход газа.





**Рис. 2.** Зависимость степени деструкции молекул углеводородного газа от уровня СВЧ мощности

Fig. 2. Dependence of destruction degree of hydrocarbon gas molecules on microwave power level

Из полученных результатов видно, что зависимости степени деструкции молекул газа от уровня СВЧ мощности, вводимой в разряд, носят линейный характер. Степень деструкции углеводородного газа увеличивается при добавлении в газ азота.

На рис. 3 представлена зависимость степени деструкции  $K_{\text{лестр}}$  молекул углеводородного газа от от-

носительной концентрации азота в углеводородном газе  $\beta$ .



**Рис. 3.** Зависимость степени деструкции молекул углеводородного газа от относительной концентрации азота в газовой среде

*Fig. 3.* Dependence of destruction degree of hydrocarbon gas molecules on nitrogen relative concentration in gas medium

В работе [12] был получен аналогичный результат при воздействии высокочастотного разряда на метан. Авторы объясняют этот результат цепным механизмом разложения молекул метана с участием колебательно возбужденных молекул азота.

### Деструкция метиленового голубого и гуминовых веществ в водных растворах

Эксперименты проводили при расходе водного раствора до 2 л/ч и плазмообразующего газа до 3 м<sup>3</sup>/ч. Уровень СВЧ мощности составлял 1,2 кВт. В экспериментах с растворами метиленового голубого (МГ) концентрация МГ в растворе составляла 4 мг/л, что соответствовало оптическаой плотности раствора равной 0,35.



Длина волны, нм

- Рис. 4. Спектры оптического поглощения водного раствора МГ: 1 – спектр исходного раствора; 2 – спектр раствора после 1 цикла обработки; 3 – спектр раствора после 2-х циклов обработки
- **Fig. 4.** Spectra of optical absorption of methylene blue water solution: 1 is the spectrum of the original solution; 2 is the solution spectrum after 1 cycle of treatment; 3 is the solution spectrum after 2 cycles of treatment



**Рис. 5.** Схема деструкции МГ при обработке раствора диафрагменным и торцевыми разрядами по данным [15, 16]

Fig. 5. Scheme of methylene blue destruction when treating solution with diaphragm and front discharges by the data in [15, 16]

На рис. 4 приведены спектры оптического поглощения исходного раствора МГ и обработанного плазмой СВЧ разряда. В спектре наблюдается несколько максимумов поглощения в области 590, 290 и 200 нм. Согласно литературным данным [13, 14], поглощение в области 290 и 590 нм обусловлено хромофорными группами МГ, а поглощение в области 200 нм обусловлено собственным поглощением ядер молекул.

Как видно из рис. 4, обработка раствора МГ плазмой СВЧ разряда приводит к снижению интенсивности поглощения в области 290 и 590 нм по сравнению с исходными растворами (кривые 2 и 3), а в области 200 нм наблюдается увеличение интенсивности поглощения. Аналогичные спектры были получены при обработке раствора МГ диафрагменным и торцевыми разрядами [15, 16].

Согласно этим работам, снижение интенсивности поглощения в области 290 и 590 нм обусловлено разрушением хромофорных групп, а увеличение поглощения в области 200 нм связано с образованием новых соединений согласно схеме, представленной на рис. 5.

Так как вид спектра оптического поглощения МГ, представленный в работах [15, 16] совпадает со спектрами оптического поглощения на рис. 4, можно сделать предположение, что деструкция МГ при взаимодействии с плазмой СВЧ разряда протекает по аналогичной схеме.

Одновременно с изменением интенсивности поглощения происходит снижение pH. Можно предположить, что снижение интенсивности поглощения раствора МГ связано с образованием азотсодержащих соединений типа  $HNO_3$  и  $HNO_2$  в растворе.

При использовании в качестве плазмообразующего газа воздуха в системе накапливается диоксид азота, который образует с водой две кислоты – азотную и азотистую. В присутствии кислорода оксид  $NO_2$  целиком переходит в азотную кислоту (реакции 1 и 2):

$$2NO_2 + H_2O = HNO_3 + HNO_2$$
(1)

$$4NO_{2}+O_{2}+2H_{2}O=4HNO_{3}$$
 (2)

Данное предположение было проверено экспериментально при обработке плазмой СВЧ-разряда дистиллированной воды.

На рис. 6 представлена зависимость снижения рН раствора (кривая 1) и кинетика образования нитрат-ионов (кривая 2) в зависимости от количества циклов обработки.

Как видно из рис. 6, снижение pH раствора происходит синхронно с увеличением концентрации нитрат-ионов, что может являться причиной разрушения хромофорных групп МГ, отвечающих за интенсивность поглощения раствора в области 290 и 590 нм.



**Рис. 6.** Зависимости изменения pH раствора (кривая 1) и концентрации нитрат-ионов (кривая 2) от числа циклов обработки

**Fig. 6.** Dependences of change of the solution pH (curve 1) and concentration of nitrate ions (curve 2) on the number of cycles of treatment

Для исключения возможности образования азотсодержащих соединений был проведен эксперимент, в котором в качестве плазмообразующего газа использовали аргон. В табл. 3 приведены показатели обработанной плазмой СВЧ-разряда дистиллированной воды в воздухе и аргоне.

Таблица 3. Показатели дистиллированной воды, обработанной плазмой СВЧ-разряда

5 1				
Показатели обработанного раствора	Плазмообразующий газ Plasma-supporting gas			
Treated solution indices	Воздух/Air	Аргон/Argon		
рН	2,8	6,4		
NO₃⁻, мг/л (mg/l)	19,7	0,632		
Остаточный озон, мг/л Residual ozone, (mg/l)	2,5	0,71		
Перманганатная окисляемость (ПО), мгО <sub>2</sub> /л Permanganate value (PV), mgO <sub>2</sub> /I	38,6	3,02		
Оптическая плотность раствора Optical density of solution	0,09	0,11		

 Table 3.
 Indices of distilled water treated with microwave discharge plasma

Как видно из табл. 3 образование азотсодержащих соединений и, соответственно, снижение pH раствора обусловлено использованием воздуха в качестве плазмообразующего газа. При замене плазмообразующего газа воздуха на аргон образование азотсодержащих соединений и, соответственно, снижениее pH раствора незначительно. Согласно литературным данным [17, 18], генерирование активных частиц в растворах определяется химическим составом плазмообразуюшего газа.

В экспериментах с водными растворами гуминовых веществ использовали модельный раствор с концентрацией гуминовых веществ в дистиллированной воде равной 8 мг/л и природную воду с концентрацией гуминовых веществ 6,7 мг/л. В табл. 4 приведены параметры этих растворов до обработки и после обработки плазмой СВЧ-разряда. В качестве плазмообразующего газа использовали воздух. Каждый раствор подвергали обработке разрядом от 1 до 3 раз (1–3 цикла).

Таблица 4.	Показатели	растворов	гуминовых	веществ	ДО	И				
после обработки плазмой СВЧ-разряда										

Table 4.	Indices of humic substances before and after treat							
	ment with microwave discharge plasma							

Исследуе- мые пара- метры Exa- mined para- meters	Модельный раствор гуминовых веществ до обработки плазмой CBЧ-разряда Test solution of humic sub- stances before treatment of microway	Обработанная и от- фильтрованная проба Treated and filtered sample Количество циклов обработки Number of treatment cycles		
	piasma	1	2	3
рН	5,87	2,83	2,56	2,33
ПО, мгО <sub>2</sub> /л PV, mgO <sub>2</sub> /l	2,86	1,07	0,09	0,06
	Природная вода, содер- жащая гуминовые веще- ства, до обработки плаз- мой СВЧ-разряда Natural water containing humic substances before treatment of microwave discharge plasma			
рН	7,10	2,80	2,80	2,80
Fe <sub>общ.</sub> , мг/л (mg/l)	8,57	3,30	3,30	3,30
ПО, мгО <sub>2</sub> /л PV, mgO <sub>2</sub> /l	2,69	2,10	2,12	2,10
Si, мг/л (mg/l)	11,33	9,40	7,80	6,62
Fe (II), мг/л (mg/l)	≤0,05	3,21	3,17	3,23

Из табл. 4 видно, что под действием СВЧ-разряда происходит существенное изменение рН и перманганатной окисляемости водного раствора гуминовых веществ. Уменьшение значения ПО указывает на снижение концентрации в растворе гуминовых веществ. Снижение концентрации гуминовых веществ в растворе было подтверждено измерением концентрации общего органического углерода после фильтрования растворов, что соответствовало значениям 6,7 мг/л для необработанного раствора и 3,36 мг/л после одного цикла обработки. Снижение концентрации общего органического углерода происходит в результате их деструкции на более простые органические соединения, такие как хиноидные структуры, карбоновые и фенольные соединения, трудно растворимые в воде [19, 20].

Обработка плазмой СВЧ-разряда природной воды, содержащей не только гуминовые вещества, но и ионы Fe и Si, показала, что в реакции активно участвуют ионы железа, переходящие в ионы Fe (II), что приведено в табл. 4.

Генерирование в плазме СВЧ-разряда оксидов азота и их взаимодействие с водным раствором с образованием азотной кислоты и восстановление ионов железа являются основными окислительновосстановительными реакциями. Гуминовые вещества в этом случае не участвуют в окислительновосстановительных реакциях и не удаляются из раствора. Данные результаты подтверждаются расчетом разности потенциалов OBP. Для исследуемых гуминовых веществ значение электродного потенциала составляет 0,79 В. Для реакций (1, 2) значения электродных потенциалов находятся в диапазоне 0,80...1,68 В. Соответственно, разность потенциалов будет отрицательна, что говорит о невозможности участия гуминовых веществ в OBP.

#### Заключение

Показана эффективная деструкции углеводородного газа и водных растворов метиленового голубого и гуминовых веществ в плазме СВЧ-разряда.

В условиях эксперимента в углеводородном газе установлена степень деструкции, которая достигает 70 %. Показано, что продуктами деструкции являются водород, этилен, ацетилен и наблюдается образование новых структурных соединений в виде углеродных нанотрубок.

Выполненные эксперименты с водными растворами показывают, что основным процессом, протекающим при обработке водных растворов плазмой СВЧ-разряда, являются окислительно-восстановительные реакции. Под действием плазмы СВЧ-разряда в водном растворе МГ и гуминовых веществ происходит деструкция с образованием новых, более простых соединений.

Полученные результаты могут быть востребованы при разработке новых экологически безопасных технологий по утилизации углеводородных газов (природный, попутный нефтяной, шахтный метан, биогаз) и получении новых полезных продуктов, при очистке воды от органических веществ (гуминовых, нефтепродуктов и т. п.).

Работа выполнена по теме 7.1504.2015.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Каренгин А.А., Каренгин А.Г., Побережников А.Д. Плазменный генератор тепла на базе высокочастотного факельного плазматрона // Известия вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 11/2. – С. 165–167.
- Подзорова Е.А. Очистка коммунальных сточных вод облучением ускоренными электронами в потоке аэрозоля // Химия высоких энергий. – 1995. – Т. 29. – № 4. – С. 280–283.
- Пискарёв И.М., Севастьянов А.И., Харитонова Г.С. Разложение ароматических соединений, находящихся в водном растворе, под действием электрического коронного разряда над поверхностью жидкости // Химия высоких энергий. 1997. Т. 31. № 3. С. 236–237.
- Кутепов А.М., Захаров А.Г., Максимов А.И. Растворы и плазма // Наука в России. – 1998. – № 5. – С. 11–13.
- Зависимость от температуры скорости образования активных частиц при наносекундном стримерном коронном электрическом разряде между твердым электродом и поверхностью воды / И.М. Пискарев, Г.М. Спиров, В.Д. Селемир, В.И. Карелин, С.И. Шлепкин // Химия высоких энергий. – 2007. – Т. 41. – № 4. – С. 334–336.
- Безэлектродные электрохимические реакции в инженерной экологии / И.М. Пискарёв, А.И. Севастьянов, А.Е. Рылова, Г.С. Харитонова // Инженерная экология. – 1995. – № 6. – С. 80–81.
- Качан А.А., Замотаев П.В. Фотохимическое модифицирование полиолефинов. ? Киев: Изд-во «Наукова думка», 1990. – 280 с.
- Гильман А.Б., Потапов В.К. Модификации поверхности полимерных материалов плазмой. Значимость адгезии // Прикладная физика. – 1995. – № 3. – С. 14–22.
- Елецкий Л.В., Палкина Л.А., Смирнов Б.М. Явление переноса в слабоионизованной плазме. – М.: Атомиздат, 1975. – 206 с.
- Быков Ю.В. Диссоциация кислорода и образование озона в самостоятельном СВЧ-разряде // Химия высоких энергий. 1984. – Т. 18. – № 4. – С. 347–351.

- Nonself-sustained microwave discharge in a system for hydrocarbon decomposition and generation of carbon nanotubes / Y.D. Korolev, O.B. Frans, V. Landl, V.G. Geyman, A.G. Zerlitsyn, V.P. Shiyan, Y.V Medvedev // IEEE Trans. Plasma Sci. 2009. V. 37. № 12. P. 1. P. 2298–2302.
- A Kinetic Study on the Conversion of Methane to Higher Hydrocarbons in a Radio-Frequency Discharge / S.Y. Savinov, Y. Lee, Y.K. Song, B.K. Na // Plasma Chemistry and Plasma Processing. - 2003. - V. 23. - № 1. - P. 159-173.
- Parkansky N. Decomposition of Dissolved Methylene Blue in Water Using a Submerged Arc Between Titanium Electrodes // Journal Plasma and Chemistry. – 2013. – V. 33. – P. 907–912.
- Maksimov A., Hlyustova A., Subbotin N. Study of the degradation of methylene blue dye in aqueous solution under the action of glow and diaphragm discharges // Chemistry and Chemical Technology. - 2009. - V. 52. - P. 116-120.
- Sugiarto A.T., Sato M. Pulsed plasma processing of organic compounds in aqueous solution // Thin Solid Films. - 2001. -V. 386. - P. 295-299.
- Malik M.A., Ghaffar A., Malik S.A. Water purification by electrical // Plasma Sources and Technology. - 2001. - V. 10. -P. 82-91.
- Айнспрука Н., Браун Д. Плазменная технология в производстве СБИС. – М.: Мир, 1987. – 470 с.
- Дубровин В.Ю. Ионизационные процессы и диссоциация молекул воды в плазме пониженного давления: дис. ... канд. хим. наук. – Иваново, 1983. – 170 с.
- Баженов Д.А., Тарновская Л.И., Маслов С.Г. Физико-химические основы моделирования реакций термолиза торфа. 1. Гуминовые и фульвокислоты // Химия растительного сырья. 1998. № 4. С. 39–46.
- Сильверстейн Р., Басслер Г., Моррил Т. Спектрометрическая идентификация органических соединений. – М.: Мир, 1977. – 591 с.

Поступила 21.07.2015 г.

UDK 537.52; 533.9

# DESTRUCTION OF ORGANIC COMPOUNDS IN GASEOUS AND LIQUID MEDIA IN MICROWAVE DISCHARGE PLASMA

# Alexey G. Zerlitsyn,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia. E -mail: Zherl@tpu.ru

## Vladimir P. Shiyan,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: schijan@tpu.ru

## Lyudmila N. Shiyan,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: lshiyan@rambler.ru

# Seda O. Magomadova,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: valishevskaya s@mail.ru The paper introduces the results of experimental studies of organic compounds molecular destruction in gaseous and liquid media using a microwave discharge plasma at atmospheric pressure. A microwave plasma generator has been developed and used as a source of plasma discharge. The plasma generator was of guided-wave type with the frequency of 2,45 GHz and power of up to 3 kW. Hydrocarbon gas was used as the gas medium; the water solutions of methylene blue and more complex organic compound in the form of humic substances served as liquid medium. The research was carried out for promoting the plasma generator technology in waste management, cleaning liquid environments from harmful substances, new materials, surface modification of materials, etc.

**The aim of the research** is to study molecular compounds destruction in microwave discharge plasma at atmospheric pressure in such media as petroleum gas, water solutions of methylene blue, and humic substances.

*Methods:* optical spectroscopy, photocolorimetric analysis, analytical chemistry, pH measurement.

**Results.** New materials such as hydrogen, acetylene, ethylene, carbon nanostructured material were generated as the result of destruction of natural gas molecules in microwave discharge plasma. It is shown that nitrogen addition into natural gas increases the destruction level of the natural gas molecules. It also provides a stable operation of the plasma generator. In the experiments the 70 % destruction degree was reached. Air, nitrogen, argon were used as the plasma gases in experiments on destructing water solutions of organic substances molecular compounds. It is shown that destruction of molecular compounds in water solutions of organic substances in plasma is based on redox reactions. It was ascertained that the highest efficiency of the molecular destruction of compounds in the solution takes place when air plasma gas is used. Methylene blue solution reduces the intensity of the color in the visible spectrum at 590 nm and becomes colorless. The mechanism of destruction of organic compounds in water solutions under microwave discharge plasma was offered.

#### Key words:

Destruction, molecular compounds, microwave discharge plasma, microwave plasma generator, hydrocarbon gas, water solutions, methylene blue, humic substances.

The subject of the research is 7.1504.2015.

## REFERENCES

- Karengin A.A., Karengin A.G., Poberezhnikov A.D. Plazmenny generator tepla na baze vysokokachestvennogo fakelnogo plazmatrona [Plasma heat generator based on high-frequency jet plasmatron]. *Izvestiya Vusov. Fizika – Russian Physics Journal*, 2010, vol. 53, no. 11, pp. 165–167.
- Podzorova E.A Ochistka kommunalnykh stochnykh vod oblucheniem uskorennym elektronami v potoke aerozolya [Municipal wastewater treatment by irradiation with accelerated electrons in the flow of aerosol]. *Khimiya Vysokikh Energiy – High Energy Chemistry*, 1995, vol. 29, no. 4, pp. 280–283.
- Piskarev I.M., Sevastyanov A.I., Kharitonov G.S. Razlozhenie aromaticheskikh soediney, nakhodyashchikhsya v vodnom rastvore pod deistviem electricheskogo koronnogo razryada nad poverkhnostyu zhidkosti [Degradation of aromatic compounds in aqueous solution under the action of electric corona discharge over liquid surface]. *Khimiya Vysokikh Energiy – High Energy Chemistry*, 1997, vol. 31, no. 3, pp. 236–237.
- Kutepov A.M., Zakharov A.G., Maksimov A.I. Rastvory i plazma [Solutions and plasma]. Nauka v Rossii – Science in Russia, 1998, vol. 5, pp. 11–13.
- Piskarev I.M., Spirov G.M., Selemir V.D., Karelin V.I., Shlepkin S.I. Zavisimost ot temperatyr skorosti obrazovaniya activnykh chastits pri nanosekundnom strimernom koronnom electriheskom razryade mezhdu tverdym electrodom i poverkhnostyu vody [Temperature dependence of active particle formation rate at nanosecond streamer corona electric discharge between the electrode and water solid surface]. Khimiya Vysokikh Energiy – High Energy Chemistry, 2007, vol. 41, no. 4, pp. 334–336.
- Piskarev I.M., Sevastyanov A.I., Rylova A.E., Kharitonov G.S. Bezelectrodnye electrokhimicheskie reaktsii v inzhenernoy ekologii [Electrodeless electrochemical reactions in Environmental Engineering]. Engineering Ecology, 1995, no. 6, pp. 80–81.
- Kachan A.A., Zamotaev P.V. Fotokhimicheskoe modifitsirovanie poliolefinov [Photochemical Modification of Polyolefins]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1990. 280 p.
- Gilman A.B., Potapov V.K. Modifikatsii poverkhnosti polimernykh materialov plazmoy [Plasma modification of polymeric material surface]. *Applied Physics*, 1995, no. 3, pp. 14–22.
- Eletskii L.V., Palkina L.A., Smirnov B.M. Yavlenie perenosa v slaboionizirovannoy plazme [Transport phenomena in weakly ionized plasma]. Moscow, Atomizdat Publ., 1975. 206 p.

- Bykov Yu.V. Dissotsiatsia kisloroda i obrazovanie ozona v samostoyatelnom SVCh-razryade [Oxygen dissociation and ozone formation in a separate microwave discharge]. *Khimiya Vysokikh En*ergiy – High Energy Chemistry, 1984, vol. 18, no. 4, pp. 347–351.
- Korolev Y.D., Frans O.B., Landl V., Geyman V.G., Zerlitsyn A.G., Shiyan V.P., Medvedev Y.V Nonself-sustained microwave discharge in a system for hydrocarbon decomposition and generation of carbon nanotubesio *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2009, vol. 37, no. 12, P. 1, pp. 2298–2302.
- Savinov S.Y., Lee Y., Song Y.K., Na B.K. A Kinetic Study on the Conversion of Methane to Higher Hydrocarbons in a Radio-Frequency Discharge. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2003, vol. 23, no. 1, pp. 159–173.
- Parkansky N. Decomposition of Dissolved Methylene Blue in Water Using a Submerged Arc Between Titanium Electrodes. *Jour*nal Plasma and Chemistry, 2013, vol. 33, pp. 907–912.
- Maksimov A., Hlyustova A., Subbotin N. Study of the degradation of methylene blue dye in aqueous solution under the action of glow and diaphragm discharges. *Chemistry and Chemical Technology*, 2009, vol. 52, pp. 116–120.
- Sugiarto A.T., Sato M. Pulsed plasma processing of organic compounds in aqueous solution. *Thin Solid Films*, 2001, vol. 386, pp. 295-299.
- Malik M.A., Ghaffar A., Malik S.A. Water purification by electrical. Plasma Sources and Technology, 2001, vol. 10, pp. 82-91.
- Aynspruka N., Braun D. *Plazmennaya tekhnologiya v proizvod-stve SBIS* [Plasma technology in manufacturing VLSI]. Moscow, Mir Publ., 1987. 470 p.
- Dubrovin B.Yu. Ionizatsionnye protsessy i dssotsiatsiya molekul vody v plazme ponizhennogo davlenia. Dis. Kand. nauk [Ionization processes and water molecule dissociation in under-pressure plasma. Cand. Diss]. Ivanovo, 1983. 170 p.
- Bazhenov D.A., Tarnovskaya L.I., Maslov S.G. Fiziko-khimicheskie osnovy modelirovaniya reaktsii termoliza torfa. 1. Guminovye i fulvokisloty [Physical and chemical bases of modeling peat thermolysis. 1. Humic and fulvic acids]. *Khimiya Rastitelnogo Syriya - Chemistry of plant raw materials*, 1998, no. 4, pp. 39–46.
- Silverstain R., Bassler G., Morril T. Spektrometricheskaya identifikatsiya organicheskikh soedineniy [Spectrometric identification of organic compounds]. Moscow, Mir Publ., 1977. 591 p.

Received: 21 July 2015.

УДК 544.77, 542.06, 537.52

# ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ГУМИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ В СЛОЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ГРАНУЛ В ПРОЦЕССАХ ВОДООЧИСТКИ

# Войно Денис Александрович,

аспирант кафедры общей и неорганической химии Института физики высоких технологий ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: voida@gtt.gazprom.ru.

## Лобанова Галина Леонидовна,

канд. хим. наук, ведущий профконсультант лаборатории № 12 Института физики высоких технологий ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: lobanova@tpu.ru.

# Юрмазова Татьяна Александровна,

канд. хим. наук, доцент кафедры общей и неорганической химии Института физики высоких технологий ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: yur-tatyana@yandex.ru.

# Шиян Людмила Николаевна,

канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры общей и неорганической химии Института физики высоких технологий ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: lshiyan@rambler.ru

### Мачехина Ксения Игоревна,

канд. тех. наук, ассистент кафедры общей и неорганической химии Института физики высоких технологий ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: mauthksu@yandex.ru

Проведено исследование процесса обработки гуминовых веществ в слое железных гранул импульсным электрическим разрядом с целью очистки природных вод от органических соединений гумусового происхождения, что является актуальным для технологий водоподготовки.

**Цель работы:** определить количественные характеристики процесса водоочистки от гуминовых веществ при электроимпульсной обработке в слое железных гранул.

Методы исследования: фотоколориметрия, рН-метрия, каталитическое окисление, титрометрия, фотометрия.

**Результаты.** Определена количественная характеристика критической концентрации мицеллообразования в исследуемой системе гумат натрия – ионы железа (II), которая соответствует мольному соотношению компонентов 2:3. При указанном соотношении происходит снижение цветности и химического потребления кислорода раствора за счет участия гумата натрия и ионов железа (II) в окислительно-восстановительных реакциях с последующей коагуляцией и образованием нерастворимых соединений при pH, равном 6,5. Показано, что гумат натрия увеличивает эффективность протекания процесса окисления Fe (II) в Fe (III). Для достижения данного мольного соотношения экспериментально установлено время воздействия импульсного электрического гозаряда, которое составило 10 с. Экспериментально установленное время обработки является достаточным для достижения можно считать нецелесообразным. Показана роль вторичных процессов, протекающих после увеличение времени обработки можно считать нецелесообразным. Показана роль вторичных процессов, протекающих после отключения разряда. Установлено время для натрия увеличных процессов, протекающих после отключения разряда. Установлено время нецелесообразным перманганатьно установлено 2:3 и дальнейшее увеличение времени обработки можно считать нецелесообразным. Показана роль вторичных процессов, протекающих после отключения разряда. Установлено время контакта активных продуктов эрозии с гуматом натрия, которое составляет 1 ч. В течение этого времени значения перманганатной окисляемости и концентраций ионов железа в растворе достигают предельно допустимых концентраций и дальнейшее увеличение времени контакта не приводит к изменению контролируемых параметров.

#### Ключевые слова:

Импульсный электрический разряд, эрозия, железо, водный раствор, гуминовые вещества, природные воды.

## Введение

В настоящее время проводятся интенсивные исследования процессов очистки воды от примесей с участием различных типов электрических разрядов. [1, 2]. В работе [3] было изучено действие тлеющего и диафрагменного разрядов на водные растворы органических красителей. Показано, что действие тлеющего и диафрагменного разрядов на водные растворы органических соединений приводит к деструкции последних. В работе [4] исследовано воздействие импульсного электрического разряда (ИЭР) в слое металлических гранул, помещенных в водные растворы органических веществ.

Отличие ИЭР в слое металлических гранул, помещенных в водные растворы, от других типов разрядов в водо-воздушном потоке, состоит в комплексе явлений. Первичные явления инициируются развивающимися в исследуемой системе каналами
разрядов (импульсное тепловое, световое и электромагнитное излучения, эрозия металлической загрузки и электродов, ударные волны и кавитационные процессы). Восстановительные свойства свежей поверхности эродируемого металла и склонность присутствующих в обрабатываемом растворе веществ к окислению-восстановлению, приводят к развитию вторичных явлений, способных определять дальнейший ход химических реакций, развивающихся в электроэрозионных реакторах.

Импульсный электрический разряд в гетерогенных системах с проводящими частицами является уникальным инструментом воздействия как на жидкую [5], так и на твёрдую фазы [6]. Широкий набор воздействующих факторов, включая разрушение металлической фазы в зонах формирования каналов разрядов, приводит к интенсификации массообменных процессов, образованию активных частиц и газообразных продуктов, развитию сопряжённых окислительно-восстановительных реакций и др.

В работах [7–10] проведено исследование механизма реакций, протекающих при электроимпульсном воздействии на водные растворы метиленового голубого, фурацилина и эозина. Показано, что при действии импульсного электрического разряда в электроэрозионных реакторах протекают окислительно-восстановительные реакции и адсорбционные процессы, эффективность которых зависит от материала загрузки. Исследуемые водные растворы органических вещества по-разному участвуют в окислительно-восстановительных реакциях и адсорбционных процессах, что определяется природой метиленового голубого, фурацилина и эозина.

Настоящая работа является продолжением изучения комплекса физико-химических процессов в природных водах, содержащих гуминовые вещества при действии импульсных электрических разрядов в слое железных гранул.

Цель работы – определить количественные характеристики процесса водоочистки от гуминовых веществ при электроимпульсной обработке в слое железных гранул.

Для изучения процессов, протекающих при действии разрядов на модельные растворы и подземные воды, содержащие растворенные гуминовые вещества, и процессов их взаимодействия с продуктами эрозии необходимо решить следующие задачи:

- определить количественные характеристики критической концентрации мицеллообразования в исследуемой системе гумат натрия – ионы железа (II);
- изучить влияние гумата натрия на процесс окисления Fe (II) в Fe (III);
- исследовать воздействие ИЭР на растворы гуминовых веществ во временном интервале 5...60 с;
- изучить влияние объема обрабатываемого раствора на изменение химических показателей

(рН, цветность, концентрация Fe<sub>общ</sub>, ПО и химическое потребление кислорода (ХПК)

• оценить активность суспензии по отношению к растворенному гумату натрия.

#### Материалы и методы исследования

Схема экспериментальной установки представлена в работе [6]. Установка состоит из реактора объемом 1,5 литра со встроенными электродами, между которыми засыпаны железные гранулы массой 300 г, и импульсного источника питания. Амплитуда импульсов напряжения 500 В, длительность 15 мкс, частота следования импульсов 500 имп/с. Энергия импульса 0,5 Дж/имп. Время обработки составляло 30 с. Объем обрабатываемого раствора изменяли от 0,3 ...0,9 л.

Для исследования устойчивости растворов гуминовых веществ использовали модельные растворы гумата натрия [11, 12], выделенные из торфа болот Томской области, и подземные воды, содержащие наряду с гуминовыми веществами ионы железа и соединения кремния [13]. Исследования проводили по стандартным методикам согласно нормативным документам (НД), приведенным в табл. 1. В таблице приведены значения предельно допустимых концентраций (ПДК).

 Таблица 1.
 Методы химического анализа

 Table 1.
 Methods of chemical analysis

Определяемый компонент Analyte	Единицы измерений Units	ПДК по СанПиН 2.1.4.1074-01 MPS by the SanRaN 2.1.4.1074-01	
Водородный по- казатель — pH Hydrogen value — pH	единицы pH	FOCT P 51232-98	6-9
Железо общее Total ferrum	мг/л	ГОСТ 4011-72	0,3
Железо (II) Iron (II)	(mg/l)	ГОСТ 4011-72 (о-фенантролин)	0,3
Цветность Color	град/deg.	FOCT 3351-74	20
Кремний Silicon	мг/л (mg/l)	РД 52.24.433-2005	10
Перманганатная окисляемость (ПО) Permanganate value (PV)	мгО <sub>2</sub> /л mg O <sub>2</sub> /I	FOCT 2761-84	5,0

Центрифугирование проводили сразу после обработки растворов ИЭР, чтобы остановить окислительно-восстановительные реакции в системах эродированный металл – исследуемые вещества. Суспензии центрифугировали, используя центрифугу Allegra 54 R фирмы «Beckman-Coulter» США, при 20000 оборотов в минуту в течение 10 мин. Влияние активных частиц, инициируемых каналами разрядов, на исследуемые растворы гуминовых веществ оценивали методом исключения. Для этого обрабатывали ИЭР соответствующие объёмы дистиллированной воды, полученные суспензии вводили в раствор гуминовых веществ в количестве, обеспечивающем равные концентрации с исходными растворами. Время контакта составляло 10 с.

Таким образом, гуминовые вещества не участвовали в процессах, инициируемых каналами разрядов, а только контактировали с эродированным металлом и, возможно, с устойчивыми продуктами взаимодействия разряда с водой. Результат взаимодействия оценивали, измеряя pH цветность, концентрацию Fe<sub>общ</sub>, ПО и ХПК, и сравнивали с показателями исходного раствора.

Концентрацию общего органического углерода измеряли с использованием анализатора общего органического углерода «Sievers 820».

В процессе обработки растворов импульсным электрическим разрядом контролировали pH среды с помощью прибора «Эксперт pH».

#### Результаты и их обсуждение

Для использования метода электроимпульсной обработки в слое железных гранул в процессах водоочистки необходимо определить физико-химические параметры для эффективного удаления гуминовых веществ из природных вод. К таким параметрам можно отнести соотношение концентраций гуминовых веществ в растворе и продуктов эрозии железных гранул, которое определяется временем обработки раствора, и значения окислительно-восстановительных потенциалов ионов железа и гуминовых веществ.

Для определения физико-химических параметров процесса использовали модельные растворы гумата натрия с концентрацией от 8 до 16 мг/л, что соответствует его содержанию в природных водах [12].

Концентрацию гуминовых веществ в растворе определяли по значению ПО, ХПК и по содержанию общего органического углерода (ТОС). Кроме этого, для растворов органических веществ не менее важным показателем является цветность раствора, что по данным работы [14, 15] характеризуется не только количеством растворенных гуминовых веществ, но и содержанием железа в растворе.

В работах [16, 17] показано, что при определенном соотношении гуминовых веществ и ионов железа в растворе образуется нерастворимый осадок, что приводит к снижению концентрации гуминовых веществ в растворе. Это соотношение называется критической концентрацией мицелообразования (ККМ).

Методы определения ККМ, используемые в настоящее время, основаны на изменении физикохимических свойств исследуемой системы в области критических концентраций [18]. Количественной характеристикой ККМ в исследуемой системе служит соотношение концентраций гумата натрия и ионов железа (II) при определенном значении рН раствора.

Для определения ККМ в модельном растворе, содержащем 8 мг/л гумата натрия, изменяли концентрацию ионов железа (II) в диапазоне от 5 до 50 мг/л и наблюдали за изменением цветности раствора и значением ХПК (рис. 1).



**Рис. 1.** Зависимость изменения цветности (1) и ХПК раствора гумата натрия (2) от концентрации железа (II) в растворе

**Fig. 1.** Dependence of color change (1) and chemical oxygen demand (COD) in sodium humate (2) on iron (II) concentration in solution

Полученные экспериментальные результаты показали, что при концентрациях гуминовых веществ 8 мг/л и ионов железа в растворе 20 мг/л, что соответствует мольному соотношению 2:3, происходит снижение цветности и ХПК раствора, что связано с образованием нерастворимых соединений при рН равном 6,5. Согласно литературным данным [17, 18] образование осадка обусловлено взаимодействием растворимого гумата натрия с ионами 2-х и трехвалентных катионов металлов.

Кроме обменных реакций, протекающих с образованием осадков, гуминовые вещества могут участвовать в окислительно-восстановительных реакциях и выступать в роли окислителей благодаря наличию в их структуре различных функциональных групп, таких как хиноидные, фенольные, карбоксильные, карбонильные, ответственных за реакции переноса электрона [19, 20].

Экспериментально показано, что взаимодействие гумата натрия с ионами 2-х валентного железа сопровождается протеканием OBP, в которых гуминовые вещества выполняют роль окислителя [16]. На рис. 2 приведены зависимости изменения концентрации железа (II) в дистиллированной воде (1) и в растворе гумата натрия (2) от времени окисления кислородом воздуха при значении pH раствора равного 5,6. Указанное значение pH получено при растворении гумата натрия и сульфата железа (II) в дистиллированной воде при концентрациях 8 и 10 мг/л соответственно.

Из рис. 2 видно, что окисление железа (II) в растворе происходит наиболее эффективно в присутствии растворимых гуминовых веществ, что хорошо согласуется с литературными данными. Например, в работах [19, 20] показано, что движущей силой OBP является разность потенциалов между гуминовыми веществами и ионами железа, что связано с набором редокс-активных структурных фрагментов, отличающихся по значению электродных потенциалов. Разность потенциалов зависит от кислотности среды, возрастая с увеличением значения pH раствора.



**Рис. 2.** Зависимость изменения концентрации железа (II) в дистиллированной воде (1) и растворе гумата натрия (2) от времени окисления кислородом воздуха

**Fig. 2.** Dependence of iron (II) concentration change in distilled water (1) and in sodium humate solution (2) on time of air oxidation with oxygen

Полученные экспериментальные результаты могут быть реализованы при очистке воды в электроимпульсном реакторе с железной загрузкой.

Известно [8], что при действии импульсного электрического разряда на железные гранулы в водных растворах образуются частицы эродированного железа, протекают окислительно-восстановительные реакции перехода  $\mathrm{Fe}^{2+} \rightarrow \mathrm{Fe}^{3+}$  и изменяется pH раствора в диапазоне 6,5.....9,5 (рис. 3).



**Рис. 3.** Изменение pH раствора гумата натрия от времени обработки импульсным электрическим разрядом

Fig. 3. Change in pH of sodium humate solution on time of treatment with pulsed electric discharge

Для создания условий эффективной коагуляции гуминовых веществ в процессе электроимпульсного воздействия исследовали влияние времени обработки на процесс образования нерастворимой формы гуминовых веществ. На рис. 4 приведена зависимость цветности раствора гумата натрия и концентрации ионов железа (II), образующихся при взаимодействии эродированного железа с водой, от времени обработки импульсным электрическим разрядом.



**Рис. 4.** Зависимость цветности раствора гумата натрия (1) и концентрации ионов железа (2) от времени обработки импульсным электрическим разрядом

*Fig. 4.* Dependence of sodium humate solution color (1) and iron ion concentration (2) on time of treatment with pulsed electric discharge

Из рис. 4 видно, что наиболее интенсивное снижение цветности до значений ПДК происходит при времени обработки не более 10 с, при котором концентрация ионов железа (II) в растворе соответствует значению 18 мг/л. Экспериментально установленное время обработки 10 с является достаточным для достижения мольного соотношения гуминовые вещества – ионы железа, равного 2:3. Дальнейшее увеличение времени обработки можно считать нецелесообразным. При установленном мольном соотношении происходит взаимодействие ионов железа с гуматом натрия с последующей коагуляцией с образованием осадка. Концентрация ионов железа в растворе не превышает предельно допустимую концентрацию, равную 0,3 мг/л.



**Рис. 5.** Зависимость значений ХПК (1) и ПО (2) от времени обработки ИЭР



Снижение цветности раствора, как индикатора концентрации гумата натрия, было подтверждено измерением ПО, ХПК и измерением концентрации общего органического углерода (ТОС). На рис. 5 и в табл. 2 показана зависимость изменения этих показателей от времени обработки раствора импульсным электрическим разрядом. Из рис. 5 видно, что изменение XПК и ПО хорошо коррелируют с изменением цветности раствора (рис. 4) и максимальное снижение концентрации гуминовых веществ достигается также при времени обработки 10 с.

Изменения концентрации общего, органического и неорганического углерода в исследуемых растворах в процессе обработки ИЭР приведены в табл. 2.

Таблица 2. Изменение концентрации общего, органического и неорганического углерода в исследуемых растворах гуминовых веществ в процессе обработки ИЭР

**Table 2.** Change in concentration of total, organic and inorganic carbon in the examined humic substance solutions treated with pulsed electric discharge

Время обрабо Time of solut	отки раствора, с ion treatment, s	0	5	10	15	20	30
	общего (T) total	11,7	11,5	11,2	11,0	10,9	10,5
углерода, мг/л Concentration	общего органи- ческого (TO) total organic	9,2	4,2	2,3	1,9 1,8	1,8	1,8
(mg/l)	общего неорга- нического (TI) total inorganic	2,5	7,3	8,9	9,1	9,1	8,7

Из табл. 2 видно, что с увеличением времени обработки происходит снижение концентрации общего органического углерода и при этом наблюдается увеличение концентрации неорганического углерода. Следует отметить, что концентрация общего углерода в исследуемых растворах остается примерно одинаковой. Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать вывод о том, что при электроимпульсном воздействии происходит деструкция гумата натрия с образованием неорганической формы соединений в виде гидрокарбонатов и карбонатов без образования газообразного СО<sub>2</sub>. Следовательно, основным механизмом, реализуемым при использовании метода электроимпульсной обработки для удаления гуминовых веществ из природных вод, является их взаимодействие с ионами железа с последующей коагуляцией и образованием нерастворимых соединений.

Как было показано в работах [7, 8], в процессе электроимпульсной обработки растворов с участием металлической загрузки наибольший вклад вносят вторичные процессы, протекающие после отключения разряда.

Для изучения активности суспензии подвергали обработке в течение 10 с дистиллированную воду и после отключения разряда добавляли в суспензию раствор гумата натрия. Концентрацию гумата натрия подбирали в количестве, обеспечивающем равные концентрации с исходными растворами, и через определенные промежутки времени (1–6 ч) оценивали активность суспензии по отношению к растворенному гумату натрия. Результат взаимодействия наблюдали по изменению концентрации общего железа и значению ПО и сравнивали с показателями исходного раствора гумата натрия.

На рис. 6 приведена зависимость изменения общего железа и ПО раствора гумата натрия от времени контакта с активными продуктами эрозии железа.



**Рис. 6.** Зависимость изменения Fe<sub>общ</sub> (1) и ПО (2) раствора гумата натрия от времени контакта с активными продуктами эрозии железа



Из рис. 6 видно, что оптимальное время контакта активных продуктов эрозии с гуматом натрия составляет 1 ч, при этом время ПО и концентрация железа в растворе достигают значений ПДК и дальнейшее увеличение времени контакта не приводит к изменению контролируемых параметров. Экспериментально установленное время контакта показывает, что для раствора с концентрацией гумата натрия, равной 8 мг/л, загрузка остается активной как минимум 1 ч после отключения действия разряда. Активность загрузки связана с взаимодействием продуктов эрозии железа с водой и гуматом натрия.

Концентрацию эродированного железа в растворе можно изменять не только временем воздействия ИЭР, но и объемом обрабатываемого раствора.

Для выбора объема рабочего раствора в реакторе исследовали воздействие ИЭР в течение 10 секунд на разные объемы исследуемых растворов гумата натрия с концентрацией 16 мг/л, что соответствует значению ХПК, равному 22,6 мгО/л.

В табл. З приведены зависимости pH, цветности, Fe<sub>общ</sub>, ПО, XПК от объема рабочего раствора в реакторе.

Из табл. 3 видно, что исследуемые показатели зависят от объема рабочего раствора. При объеме 300 и 450 мл наблюдается повышенное значение pH, равное 9,7 и 9,1 соответственно. С увеличением объема раствора значение pH стремится к значению 7,5. Цветность раствора изменяется от 114 град. цветности в исходном растворе до 8 град. цветности для объема 0,3 л. Наряду с изменением цветности раствора, характеризующей наличие гуминовых веществ, изменяется и значение ПО и ХПК. Анализ результатов таблицы показал, что при объеме раствора 0,6 л все контролируемые показатели соответствуют нормативным значениям для питьевой воды и дальнейшие эксперименты на подземных водах выполнены при указанном объеме раствора.

**Таблица 3.** Зависимости рН, цветности, Fe<sub>общ</sub>, ПО от объема рабочего раствора в реакторе

Table 3.	Dependences of	pH, color,	$Fe_{total}, PV$	on working	solu
	tion volume in a	reactor			

Показатели Indices	Исходный p-p гумата натрия Original solution of sodium humate	Объемы обрабатываемого раствора, л Volumes of treated solution, I							
Ha	6.5	7.3	7.5	7.6	9,1	9.7			
Цветность, град Color, deg.	114	55	35	20	10	8			
Fe <sub>общ</sub> , мг/л Fe <sub>total</sub> , mg/l	1,26	0,84	0,67	0,29	0,25	0,23			
ПО, мгО/л PV, mgO/l	14,26	8,20	4,82	2,20	1,82	1,82			
ХПК, мгО/л COD, mgO/l	22,6	12,9	6,2	<4,0	<4,0	<4,0			

В качестве реальной воды использовали скважинную воду п. Белый Яр Томской области. Вода имеет сложный химический состав и содержит кроме гуминовых веществ ионы железа и соединения кремния. В работах [12, 14] показано, что способность к образованию коллоидных соединений в таком типе вод вызывает проблемы в процессах водоочистки. Трудности удаления примесей в коллоидном состоянии связаны с их устойчивостью к физико-химическим воздействиям, используемым в технологиях очистки воды.

На рис. 7 приведена зависимость изменения ПО и цветности раствора от времени воздействия ИЭР. Минимальное время обработки составляло 5 с, максимальное – 60 с.



**Рис. 7.** Зависимость изменения ПО (1) и цветности (2) от времени обработки ИЭР

Fig. 7. Dependence of PV change (1) and color (2) on time of treatment with pulsed electric discharge

На рис. 8 приведены изменения концентрации железа общего и кремния при тех же временах обработки раствора.



**Рис. 8.** Зависимость изменения концентрации кремния (1) и концентрации общего железа (2) от времени обработки ИЭР

**Fig. 8.** Dependence of silicon concentration change (1) and total iron concentration (2) on time of treatment with pulsed electric discharge

Как видно из рис. 7 и 8, при обработке реальной подземной воды происходит снижение концентрации не только гуминовых веществ, но и ионов железа и кремния. Максимальное снижение контролируемых показателей происходит при времени воздействия близком к 10 с обработки, что хорошо коррелируется с полученными выше результатами при обработке модельных растворов гуминовых веществ.

#### Выводы

- Определена количественная характеристика критической концентрации мицеллообразования в исследуемой системе гумат натрия – ионы железа (II), которая соответствует мольному соотношению компонентов 2:3. При указанном соотношении происходит снижение цветности и ХПК раствора за счет участия гумата натрия и ионов железа (II) в ОВР с последующей коагуляцией с образованием нерастворимых соединений при рН, равном 6,5.
- 2. Показано, что гумат натрия увеличивает эффективность протекания процесса окисления Fe (II) в Fe (III).
- 3. Показано, что наиболее интенсивное снижение цветности до значений ПДК происходит при времени обработки не более 10 с. Экспериментально установленное время обработки является достаточным для достижения мольного соотношения гуминовые вещества – ионы железа, равного 2:3, и дальнейшее увеличение времени обработки можно считать нецелесообразным.
- 4. Установлено, что объем обрабатываемого раствора влияет на эффективность удаления гуминовых веществ, что связано с изменением pH раствора и концентрации продуктов эрозии в растворе.

 Показана роль вторичных процессов, протекающих после отключения разряда, которые обусловлены активностью суспензии. Установлено время контакта активных продуктов эрозии с гуматом натрия, которое составляет 1 час. В течение этого времени значение ПО и

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Пискарев И.М. Модель реакций при коронном разряде в системе O<sub>2</sub>(г)-H<sub>2</sub>O // Журнал физической химии. – 2000. – Т. 74. – № 3. – С. 546-551.
- Зависимость от температуры скорости образования активных частиц при наносекундном стримерном коронном электрическом разряде между твердым электродом и поверхностью воды / И.М. Пискарев, Г.М. Спиров, В.Д. Селемир, В.И. Карелин, С.И. Шлепкин // Химия высоких энергий. – 2007. – Т. 41. – № 4. – С. 334–336.
- Максимов А.И., Хлюстова А.В., Субботкина Н.Н. Исследование деструкции красителей метиленового голубого в водном растворе под действием тлеющего и диафрагменного разрядов // Химия и химическая технология. 2009. Т. 52. № 9. С. 116–120.
- Электроимпульсный способ очистки воды: пат. 2220110 Рос. Федерация. № 2001126115/15; заявл. 26.09.2001; опубл. 27.12.2003, Бюл. № 13. – 4 с.
- Щерба А.А., Петриченко С.В. Физическое моделирование и анализ динамики искроплазменных процессов при электроэрозионном диспергировании токопроводящих гранул в жидкости // Техническая электродинамика. – 2004. – № 3. – С. 27–32.
- Применение импульсных электрических разрядов в водных растворах для получения наноматериалов и их использование для очистки воды / Н.Б. Даниленко, А.И. Галанов, Я.И. Корнев, П.В. Балухтин, Т.А. Юрмазова // Нанотехника. – 2006. – № 4. – С. 81–91.
- Пискарёв И.М., Севастьянов А.И., Харитонова Г.С. Разложение ароматических соединений, находящихся в водном растворе, под действием электрического коронного разряда над поверхностью жидкости // Химия высоких энергий. 1997. Т. 31. № 3. С. 236–237.
- Исследование процесса электроимпульсного воздействия на железные и алюминиевые гранулы с помощью растворов органических веществ / Г.Л. Лобанова, Л.Н. Шиян, Т.А. Юрмазова, А.И. Галанов // Известия вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 9. – С. 141–145.
- 9. Parkansky N. Decomposition of Dissolved Methylene Blue in Water Using a Submerged Arc between Titanium Electrodes // Jour-

концентрации железа в растворе достигают значений ПДК и дальнейшее увеличение времени контакта не приводит к изменению контролируемых параметров.

Работа выполнена по теме 7.1504.2015.

nal Plasma Chemistry Plasma Process. - 2013. № 33. -C. 907-919.

- Kim J.R. Heterogeneous Oxidation of Methylene Blue with Surface-Modified Iron Amended Activated Carbon // American Journal of Analytical Chemistry. 2013. № 4. C. 115-122.
- Colloid Stability of Iron Compounds in Groundwater of Western Siberia / L.N. Shiyan, E.A. Tropina, K.I. Machekhina, E.N. Gryaznova, V.V. An // SpringerPlus. – 2014. – № 3. DOI: 10.1186/2193-1801-3-260. URL: http://www.springerplus.com/content/3/1/260 (дата обращения: 08.07.2015).
- Мачехина К.И., Шиян Л.Н., Тропина Е.А. Устойчивость коллоидов железа в природных водах // Журнал прикладной химии. 2012. Т. 85. № 7. С. 1182?1185.
- Видяйкина Н.В. Обеспечение экологической безопасности при использовании сельским населением подземных вод для питьевых целей на примере Томской области и Ханты-Мансийского автономного округа: дис.... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2010. – 153 с.
- Мачехина К.И. Процесс очистки подземных вод от коллоидных соединений железа и его аппаратурное оформление: дис....канд. тех. наук. – Томск, 2013. – 121 с.
- Войно Д.А., Шиян Л.Н., Мачехина К.И. Комплексный подход получения питьевой воды из подземных источников Западной Сибири // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2015. – Т. 58. – № 3. – С. 82–86.
- 16. Мальцева Е.В. Физико-химические свойства гуминовых кислот, модифицированных методом механоактивации каустобиолитов, и их взаимодействие с биоцидами: дис.... канд. хим. наук. – Томск, 2010. – 127 с.
- Аюкаев Р.И., Петров Е.Г., Аюкаев Р.Р. Проблемы удаления гумусовых веществ из поверхностных и подземных вод в России // Вода и экология: проблемы и решение. – 2000. – № 1. – С. 3–12.
- Жуков Б.Д. Коллоидная химия. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 384 с.
- Struyk Z., Sposito G. Redox properties of standard humic acids // Geoderma. – 2001. – V. 102. – P. 329–346.
- Matthiessen A. Determining the redox capacity of humic substances // Vom Vasser. 1995. V. 84. P. 229–235.

Поступила 10.07.2015 г.

UDK 542.06; 544.77, 537.52

# ELECTROPULSE TREATING OF HUMIC SUBSTANCE AQUEOUS SOLUTIONS IN A LAYER OF IRON GRANULES AT WATER PURIFICATION

# Denis A. Voyno,

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

# Galina L. Lobanova,

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

## Tatiana A. Yurmazova,

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

# Lyudmila N. Shiyan,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: lshiyan@rambler.ru

# Ksenia I. Machekhina,

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

The authors have studied the processing of humic substances in a layer of iron pellets with pulsed electric discharge for natural water purification from organic compounds of humic origin in northern regions of Russia, that is relevant for water treatment technologies. **The aim of the research** is to determine the quantitative characteristics of water purification from humic substances in electric pulse processing in the layer of iron pellets.

Methods: photocolorimeter, pH-meter, catalytic oxidation, titrometry.

**Results.** The authors determined the quantitative characteristic of critical micelle concentration in the system sodium humate – iron ions (II), which corresponds to a mole ratio of the components of 2:3. The color of solution and demand of chemical oxygen occur at the specified ratio due to the participation of sodium humate and iron ions (II) in oxidation-reduction reactions with further coagulation and formation of insoluble compounds at pH of 6,5. It is shown that sodium humate increases the efficiency of Fe (II) oxidation in Fe (III). In order to achieve this molar ratio, the action time of pulsed electric discharge was determined experimentally. It is 10 seconds. The paper demonstrates the role of the secondary processes after discharge disconnection. The authors determined the contact time of erosion active products with sodium humate, which is 1 hour. During this time, the values of permanganate oxidation and iron ions concentration in solution achieve the value of maximum permissible concentrations and further increase of the contact time does not result in changing the controlled parameters.

#### Key words:

Pulsed electric discharge, erosion, iron, aqueous solution, humic substances, natural water.

The subject of the research is 7.1504.2015.

#### REFERENCES

- 1. Piskarev I.M. Model reaktsiy pri koronnom razryade v sisteme O<sub>2</sub>(g)-H<sub>2</sub>O [Response model in the corona discharge in the system O<sub>2</sub>(h)-H<sub>2</sub>O]. *Journal of Physical Chemistry*, 2000, vol. 74, no. 3, pp. 546-551.
- Piskarev I.M., Selemir V.D., Karelin V.I., Shlepkin S.I. Zavisimost ot temperatury skorosti obrazovaniya activnykh chastits pri nanosekundnom strimernov koronnom electricheskom razryade mezhdu tverdym electrodom i poverkhnostiyu vody [Ttemperature dependence of active particles formation rate in nanosecond streamer corona electric discharge between the electrode and the solid surface of the water]. *Chemistry High Energy*, 2007, vol. 41, no. 4, pp. 334–336.
- Maksimov A.I., Khlyustova A.V., Sybbotkina N.N. Issledovanie destruktsii krasiteley methylenovogo golubogo v vodnom rastvore pod deystviem tleyushchego i diafragmennogo razryadov [Investigation of the degradation of methylene blue dye in aqueous solution under the action of glow and orifice discharges]. Chemi-

stry and Chemical Engineering, 2009, vol. 52, no. 9, pp. 116-120.

- Levchenko Yu.V., Levchenko V.F. Elektoimpulsny sposob ochistki vody [Electric pulse method for purifying water]. *Patent RF*, no. 2220110, 2003.
- Sherba A.A., Petrichenko S.V. Fizicheskoe modelirovanie i analiz dinamiki iskroplazmennykh protsessov pri elektroerozionnom dispergirovanii tokoprovodyashchikh granul v zhidkosti [Physical modeling and analysis of spark-plasma processes dynamics at electroerosion dispersion of conducting granules in liquid]. *Technical Electrodynamics*, 2004, no. 3, pp. 27–32.
- Danilenko N.B., Galanov A.I., Kornev Ya.I., Balukhtin P.V., Yurmazova T.A. Primenenie impulsnykh electricheskikh razryadov v vodnykh rastvorakh dlya polucheniya nanomaterialov i ikh ispolzovanie dlya ochistki vody [Using pulsed electric discharges in aqueous solutions to produce nanomaterials and their use for water purification]. *Nanotechnics*, 2006, no. 4, pp. 81–91.
- 7. Piskarev I.M., Sevastyanov A.I., Kharitonov G.S. Razlozhenie aromaticheskikh soedineny, nakhodyashchikhsya v vodnom ra-

stvore pod deystviem electricheskogo koronnogo razryada nad poverkhnostyu zhidkosti [Degradation of aromatic compounds in aqueous solution under the action of electric corona discharge over liquid surface]. *Chemistry High Energy*, 1997 vol. 31, no. 3, pp. 236–237.

- Lobanova G.L., Shiyan L.N., Yurmazova T.A., Galanov A.I. Isledovanie protsessa electroimpulsnogo vozdeystviya na zheleznye i aliminievye granuly s pomoshchyu rastvorov organicheskikh veshchestv [Investigation of electric-pulse impact on iron and aluminum granules by of organic substance solutions]. Proceedings of the universities. Physics, 2014, vol. 57, no. 9, pp. 141-145.
- Parkansky N. Decomposition of Dissolved Methylene Blue in Water Using a Submerged Arc between Titanium Electrodes. *Journal Plasma Chemistry Plasma Process*, 2013, no. 33, pp. 907–919.
- Kim J.R. Heterogeneous Oxidation of Methylene Blue with Surface-Modified Iron Amended Activated Carbon. American Journal of Analytical Chemistry, 2013, no. 4, pp. 115–122.
- Shiyan L.N., Tropina E.A., Machekhina K.I., Gryaznova E.N., An V.V. Colloid Stability of Iron Compounds in Groundwater of Western Siberia. *SpringerPlus*, 2014, no. 3. DOI: 10.1186/2193-1801-3-260. Available at: http://www.springerplus.com/content/3/1/260 (accessed 08 July 2015).
- Machekhina K.I., Shiyan L.N., Tropina E.A. Ustoychivost kolloydov zheleza v prirodnykh vodakh [Stability of iron colloids in natural waters]. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2012, vol. 85, no. 7, pp. 1182?1185.
- 13. Vidaykina N.V. Obespechenie ekologicheskoy bezopasnosti pri ispolizovanii selskim naseleniem podzemnykh vod dlya pityevykh tseley na primere Tomskoy oblasti i Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga. Dis. Kand. nauk [Environmental safety in use of groundwater by rural population for drinking purposes by the

example of Tomsk Region and Khanty-Mansi Autonomous Region. Kand. Diss.]. Tomsk, 2010. 153 p.

- Machekhina K.I. Protsess ochistki podzemnykh vod ot kolloydnykh soedineniy zheleza i ego apparaturnoe oformlenie. Avtoref. Dis. Kand. nauk [Groundwater purification from iron colloidal substances and its hardware design. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2013. 121 p.
- Voyno D.A., Shiyan L.N., Machekhina K.I. Kompleksniy podkhod polucheniya pityevoy vody iz podzemnykh istochnikov Zapadnoy Sibiri [Integrated approach to obtaining drinking water from underground sources of Western Siberia]. News of Higher Schools. Chemistry and Chemical Engineering, 2015, vol. 58, no. 3, pp. 82–86.
- 16. Maltseva E.V. Fiziko-khimicheskie svoystva guminovykh kislot, modifitsirovanykh metodom mekhanoaktivatsii kaustobilotov i ikh vzaimodeystvie s biotsidami [Physico-chemical properties of humic acids, modified by the method of caustobiolite mechanical activation, and their interaction with biocides. Dis. Kand. nauk]. Tomsk, 2010. 127 p.
- Ayukaev R.I., Petrov E.G., Ayukaev R.R. Problemy udaleniya gumusovykh veshchestv iz poverkhnostnykh i podzemnykh vod v Rossii [Problems of removing humic substances from surface and ground waters in Russia]. Water and Ecology: Problems and Solutions, 2000, no. 1, pp. 3–12.
- Zhukov B.D. Kolloidnaya khimiya [Colloid Chemistry]. Novosibirsk, NSTU Press, 2006. 384 p.
- Struyk Z., Sposito G. Redox properties of standard humic acids. Geoderma, 2001, vol. 102, pp. 329–346.
- Matthiessen A. Determining the redox capacity of humic substances. Vom Vasser, 1995, vol. 84, pp. 229–235.

Received: 10 July 2015.

УДК: 552.3:550.4:550.42:550.93

# ПЕТРОЛОГИЯ И ЗОЛОТОНОСНОСТЬ АДАКИТОВЫХ ГРАНИТОИДОВ УСТЬ-БЕЛОВСКОГО КОМПЛЕКСА МАКАРЬЕВСКОГО АРЕАЛА ГОРНОГО АЛТАЯ

# Гусев Анатолий Иванович,

д-р геол.-минерал. наук, профессор каф. географии и экологии естественно-географического факультета Алтайской государственной академии образования им. В.М. Шукшина, Россия, 659333, г. Бийск, ул. Советская, д. 11. E-mail: anzerg@mail.ru

## Коробейников Александр Феопенович,

д-р геол.-минерал. наук, профессор каф. геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: lev@tpu.ru

Актуальность исследования вызвана необходимостью изучения петрологических и геохимических особенностей габбро-гранитоидных массивов Макарьевского ареала, с которыми пространственно связаны проявления золота. Целью исследования является изучение геологических, петрологических и геохимических признаков всех породных типов усть-беловского комплекса ареала с использованием канонических классификационных и экспериментальных диаграмм, позволяющих решать генетические проблемы. Определение редких и рассеянных элементов в породах выполнено методом индуктивно-связанной плазмы на масс-спектрометре «ОРТІМА-4300». Абсолютный возраст пород определён U-Pb методом SHRIMPIIпо циркону. Рассмотрены геологические особенности, петрология, геохимия, абсолютный возраст и генезис гранитоидов Макарьевского ареала усть-беловского комплекса Горного Алтая. В его состав входят Черноключевской, Сосновский, Усть-Осиновский, Щемиловский, Макарьевский и другиемассивы. Выделены 5 фаз, включающих габброиды, диориты, тоналиты, трондъемиты, лейкограниты. Приведен уран-свинцовый возраст гранитоидов, отвечающий интервалу 349÷353±12млн лет. Встроении массивов отмечается прямая зональность с локализацией ранних фаз по периферии, а более поздних — в центре. Гранитоиды разгнейсованы. По петрогеохимическим данным кислые разности показывают признаки высококремнистых адакитовых гранитоидов. Габброиды ранней фазы Макарьевского ареала, вероятно, были генерированы частичным плавлением слэба, представленного флюид-метасоматизированным мантийным перидотитом. А более поздние дериваты обязаны смешению базитовой и адакитовойродоначальных магм. Генерация высококремнистых адакитов связана с прямым плавлением субдуцируемой океанической коры, преобразованной в ходе погружения в амфиболиты или эклогиты. Адакитовые гранитоиды Макарьевского ареала формировались частичным плавлением (степень плавления около 50 %) 10 % гранатового амфиболита. Высокая флюидонасыщенность расплавов приводила к трансформации соотношений многих элементов с проявлением тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ М-и W-типов. Уменьшение величины тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ W-типа коррелируется с увеличением концентраций золота в породах. Пространственно и парагенетически с гранитоидами Макарьевского ареала связаны проявления золота скарнового и жильного типов.

#### Ключевые слова:

Габбро, диориты, тоналиты, трондъемиты, лейкограниты, высококремнистые адакиты, плавление флюид-метасоматизированного перидотита, частичное плавление гранатового амфиболита, смешение магм, тетрадный эффект фракционирования РЗЭ, золотое оруденение.

#### Введение

Адакитовые гранитоиды в силу своей специфики образования часто являются золотогенерирующими. Ярким примерам связи адакитовых гранитоидов и золотого оруденения является Бакырчикское месторождение в Казахстане [1]. На территории Горного Алтая к адакитовому типу гранитоидов относятся кислые дериваты усть-беловского комплекса с ареалами: Бащелакским, Макарьевским, Чарышским, Усть-Чарышским, Курьино-Куяганским, Рыбалкинским, Чикетаманским. Для выявления рудогенерирующей и металлогенической роли магматических комплексов чаще всего используются петролого-геохимические критерии. По Макарьевскому ареалу гранитоидов усть-беловского комплекса получены новые аналитические данные, которые позволяют совместно с геологическими данными конкретизировать петрологические и геохимические особенности, а также металлогеническую специфику гранитоидов этого района.

#### Результаты исследований

К Макарьевскому ареалу гранитоидов относятся массивы: Черноключевский, Сосновский, Усть-Осиновский, Щемиловский, Макарьевский и другие. В их составе выделяются 5 фаз: 1 – габброиды; 2 – диориты и кварцевые диориты; 3 – тоналиты; 4 – трондъемиты; 5 – лейкограниты.

Габброиды первой фазы комплекса обычно в виде мелких разрозненных тел фиксируются по периферии гранитоидных интрузивов Макарьевского ареала. Наиболее крупное такое тело (несколько метров в поперечнике) выявлено бурением в районе Батунковского месторождения вольфрама.

Диориты и кварцевые диориты слагают внутренние части интрузивов Сосновского, Черно-



- Рис. 1. Карта полезных ископаемых Макарьевского ареала по В.А. Кривчикову с добавлениями А.И. Гусева: 1 Аллювиальные отложения пойм; 2 пролювиальные и делювиальные отложения; белокурихинский комплекс: 3 дайки аплитов; 4 дайки гранит-порфиров; 5 умеренно-щелочные лейкограниты биотитовые и двуслюдяные третьей фазы; 6 граниты порфировидные главной (второй) фазы; усть-беловский комплекс Макарьевского ареала: 7 гранодиориты третьей фазы; 8 диориты, кварцевые диориты второй фазы; 9 дайки долеритов, габбро-долеритов урсульского комплекса;10 лавы андезитов, андезибазальтов, базальтов, дацитов, риолитов, туфов и туфолав среднего и кислого составов куяганской свиты; барагашская свита: 11 песчаники, алевролиты, известняки верхней подсвиты; 12 известняки биогермныесредней подсвиты; 13 пестроцветные песчаники, алевролиты, известняки, гуффиты, конгломераты нижней подсвиты; песчанскийкомплекс: 14 пестроцветные есаницы, амфиболиты белокурихинского полиметаморфического комплекса эпидот-амфиболитовой фации; тектонические нарушения: 17 сбросы, взбросы, сдвиги; 18 надвиги: а) под покровом четвертичных образований; 6) в коренном залегании; 19 скарны; 20 роговики; 21 кварцевые жилы; 22 грейзены; 23 проявления золота; 24 месторождения вольфрама; 25 элементы залегания пород; 26 места находок фауны
- **Fig. 1.** Map of mineral resources of Makarevskii range by A.D. Krivchikov with additions of A.I. Gusev: 1 alluvial deposits of alluvial flats; 2 proluvial and deluvial deposits; Belokurikhinskii complex: 3 dikes of aplite; 4 dikesof granite porphyries; 5 moderate alkali biotiteleucogranites and two mica leucogranites of the third phase; 6 porphyritic granites of the main (second) phase; Ust-Belovskii complex of Makarevskii range: 7 granodiorites of the third phase; 8 diorites, quartz diorites of the second phase; 9 dikes of dolerites of Ursulskii complex; 10 lava of andesites, andesi-basalts, basalts, dacites, riolites and tuffs, tufflava of middle and acidic composition of Kuyaganskaya suite; Baragashskaya suite: 11 sandstones, alevrolites, limestones gravellites, conglomerates of lower subsuite; Peschanskii complex: 14 variegated sandstones, alevrolites, phyllites, tuffites, gravellites of Peschanskaya suite; 15 sills ofdolerites; 16 gneiss, schists, amphibolites of Belokurikhinskiipolimetamorphyc complex of epidot-amphybolite phase; tectonic breaks: 17 normal faults, reverse fault, strike-slip faults; 18 thrust faults: a) under the Anthropogenic deposits; 6) in the primary attitude; 19 –skarns; 20 –hornfels; 21 quartz lodes; 22 greisens; 23 gold occurrence; 24 tungstendeposits; 25 elements of rock bedding; 26 spots of fauna findings

ключевского и других. Тоналиты, как правило, занимают также внутренние части интрузий и являются основной фазой. Центральные части массивов занимают более поздние фазы: граниты, трондъемиты, лейкограниты.

Массивы Макарьевского ареала, вероятно, представляют собой части изначально крупных

интрузивных тел, разобщенных внедрившимся Белокурихинским плутоном (рис. 1) [2].

По результатам бурениягранитоиды Макарьевского ареала усть-беловского комплекса установлены за пределами Белокурихинского надвига под покровом палеоген-четвертичных отложений Бийско-Барнаульской впадины. Контакты УстьОсиновского и Сосновского массивов с породами рамы непосредственно в обнажениях не наблюдались, однако в плане контакты имеют секущее положение относительно сланцеватости в метаморфитах и слоистости в отложениях нижнего девона. Западный контакт Черноключевского массива, по крайней мере, частично, тектонический. Зона разлома выполнена кварцевой жилой мощностью 1,2 м, к западу от которой наблюдаются метаморфиты протерозоя, а восточнее - гнейсовидные гранодиориты. Контактово-метаморфические изменения протерозойских кристаллических сланцев и гнейсов в экзоконтактах массивов не проявлены, а контактовый ореол в отложениях девона юго-восточнее Сосновского массива затушеван последующим мощным ороговикованием со стороны Белокурихинского массива.

Характерной особенностью гранитоидов Макарьевского ареала является их гнейсовидность. Частично она обусловлена проявлением мощного динамометаморфизма в восточной части Белокурихинского блока. Гнейсовидные бластокатаклазиты Сосновского массива по облику приближаются к протерозойским гнейсам, в связи с чем рядом исследователей рассматривались в составе метаморфических образований [3]. Однако на соседней к востоку площади (район р. Даниловка) установлено, что гнейсовидные, плойчатые разности и массивные тоналиты имеют один и тот же химический состав и возраст (соответственно 349 и 353 млн лет U/Pb-методом по цирконам), резко отличающийся от возраста метаморфитов [4]. Гнейсовидность гранитоидов Черноключевского и Усть-Осиновского массивов является первично магматической. В этих массивах наблюдаются постепенные переходы от гнейсовидно-полосчатых гранодиоритов, тоналитов эндоконтактовых частей интрузий к массивным меланогранитам по мере удаления от контактов. При этом гранитоиды с директивными текстурами не обнаруживают заметного катаклаза и милонитизации. Гнейсовидные гранитоиды характеризуются плитчатой отдельностью; ориентировка плитчатости и гнейсовидности совпадает. В массивных гранитах преобладает крупноглыбоваяматрацевидная отдельность. По особенностям минерального состава: слабо железистому биотиту (F=52-60), нерешетчатому триклинному ортоклазу (2V=70-74°), зональному плагиоклазу, обыкновенной роговой обманке, а также петрохимии массивные и гнейсовидные гранитоиды обнаруживают большое сходство с одноименными разностями Бащелакского ареала и других участков распространения пород усть-беловского комплекса.

Для массивов Макарьевского ареала не характерны дайковые породы.

Гранитоиды усть-беловского комплекса формировались в мезоабиссальной обстановке. На это указывают средне-крупнозернистые монцонитовые и пойкилитовые структуры, мощные ореолы ороговикования, отсутствие зон закалки и значения палеотемператур минеральных равновесий. Уровень эрозионного среза варьирует у разных массивов. Максимально эродированы гранитоиды Макарьевского ареала, в пределах которого почти полностью отсутствуют жильные образования.Характерной особенностью диоритов, тоналитов и гранодиоритов являются многочисленные меланократовые включения, указывающие на процесс минглинга/смешения базальтоидной магмы с более кислой [5].

Вещественный состав гранитоидов, форма и размеры массивов, характер контактовых ореолов типичны для тоналит-гранодиоритовой формации. Относительно высокие значения  ${}^{87}
m{Sr}/
m{Sr}{}^{86}$ (0,711-0,712) в гранитоидах Макарьевского ареала [3] указывают на широкую ассимиляцию корового материала базитовой магмой. Геохимическая специализация гранитоидов усть-беловского комплекса (V, Co, Sc, а ведущая металлогеническая -Аи, Си, Мо. Гранитоиды Макарьевского ареала являлись рудовмещающей средой при формировании месторождений вольфрама, парагенетическии пространственносвязанных с лейкогранитами белокурихинского комплекса.

Позднедевонский возраст комплекса устанавливается на основании следующих данных: 1) гранитоиды метаморфизуютживетские дайки куяганского комплекса; 2) данные радиологии уран-свинцовым методом показывают 349–353 млн лет (Сосновский массив); 353±12 млн лет (Макарьевский массив). Для сравнения гранитоиды Верхнебащелакского массива к югу от Макарьевского ареала, по данным С.П. Шокальского, имеют возраст 371±15 млн лет (U/Pb-методом по цирконам) и прорываются гранитами боровлянского комплекса с возрастом 362±8 млн лет (U/Pb-методом по цирконам).

Представительные анализы пород Макарьевского ареала сведены в табл. 1.

Породные типы обогащены флюид-обильными литофильными элементами (LILE), такими как K, Rb, Ba, и деплетированывысоко зарядными элементами (HFSE<sub>s</sub>), такими как Zr, Nb, Ta, подтверждающими их деривацию из метасоматизированного мантийного источника [7].

Нормированные отношения  $(La/Yb)_N \kappa$  хондриту варьируют от 5,66 до 19,8 и указывают на дифференцированный тип распределения. Наиболее высокие отношения свойственны тоналитам, трондъемитам, лейкогранитам. Отношения U/Th во всех породных типах менее 1 и свидетельствуют о неизменённой их природе вторичными наложенными процессами. Концентрации золота в породах Макарьевского ареала варьируют от 70 до 183 мг/т, а висмута – от 0,3 до 3,8 г/т.

По комплексу признаков кислые разности пород Макарьевского ареала следует относить к адакитовымгранитоидам. К адакитовому типу гранитоидов (AD), как известно, относятся специфические кислые интрузивные породы, обнаруживающие сходство с эффузивными адакитами. К числу таких признаков относятся очень низкие концен-

Таблица 1. Представительные анализы интрузивных пород усть-беловского комплекса Макарьевского ареала (оксиды мас. %, элементы в г/т, золото в мг/т)

Representative analysis of intrusive rocks of Ust-Belovskii complex in Ust-Belovskii complex in Makarevskii range (oxides -Table 1. wt. %, elements -g/t, gold -mg/t)

	1	2	2	4	-	6	7	0	0	10
		2	3	4	5	6	/	8	9	10
SIO <sub>2</sub>	50,1	51,2	54,3	57,2	65,5	64,9	69,9	75,1	75,3	75,2
TiO <sub>2</sub>	0,95	0,92	0,88	0,9	0,51	0,49	0,43	0,11	0,15	0,14
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,6	15,5	15,8	17,3	16,1	16,24	15,6	12,8	12,93	12,95
Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	10,1	9,9	9,31	8,42	5,45	5,15	5,0	1,2	1,3	1,25
MnO	0,21	0,2	0,20	0,17	0,12	0,11	0,12	0,05	0,06	0,07
MgO	8,3	7,9	6,6	3,9	2,1	1,97	1,91	0,17	0,21	0,2
CaO	9,1	9,0	8,9	7,1	4,7	4,6	4,4	0,76	0,8	0,83
Na <sub>2</sub> O	2,6	2,7	2,8	3,1	3,15	3,7	4,9	2,9	2,8	3,0
K <sub>2</sub> O	0,9	0,85	0,91	1,45	2,05	2,04	1,95	5,5	5,4	5,3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,18	0,16	0,16	0,17	0,13	0,15	0,14	0,04	0,05	0,06
Σ	99,42	99,6	99,46	99,71	99,81	99,35	100,51	99,6	99,36	99,5
Sc	34,9	34,78	15,1	13,3	12,9	9,64	9,7	9,3	9,5	9,2
V	55	50	52	40	40	50	40	45	42	43
Cr	40,1	37,5	38,3	24,8	26,0	34,1	30,2	23,1	21,5	20,7
Со	7,3	7,03	7,2	6,5	7,3	3,63	4,3	3,4	3,2	3,1
Ni	11,6	11,1	11,3	6,7	8,0	8,47	9,5	9,1	9,0	8,8
Li	9	10	10	17	22	25	27	4	15	10
Cs	1,1	1,3	1,2	2,1	2,6	2,8	3,0	3,6	4,8	4,1
Ве	0,7	0,9	0,8	0,8	2,1	2,1	2,5	0,8	2,1	2,0
Rb	18	19	17	19	67	55	70	125	130	128
Sr	290	285	330	315	440	430	436	90	94	93
Y	22,6	22,9	23,4	26,8	14,8	15,1	15,7	10,5	11,2	11,4
Zr	45	47	49	62	115	98	102	65	70	71
Nb	5,6	5,7	3,3	7,4	8,3	8,7	8,3	6,4	6,2	6,3
Ва	367	365	355	515	941	705	703	180	175	182
La	23,3	23,0	21,4	22,1	29,1	29,8	42,1	23,0	22,0	24,2
Ce	31,2	31,0	29,0	31,1	32,3	21,0	39,2	20,6	20,1	22,6
Pr	5,1	5,0	3,1	4,4	4,0	3,2	4,6	7,5	4,8	8,5
Nd	13,4	13,1	12,0	13,6	13,1	10,1	19,0	6,0	6,6	6,9
Sm	4,1	4,0	4,3	4,4	3,5	2,4	3,7	0,98	1,2	1,01
Eu	1,3	1,2	1,1	1,1	0,95	0,49	0,86	0,23	0,28	0,21
Gd	2,5	2,4	0,73	2,4	2,3	0,33	0,93	1,15	2,1	1,25
Tb	0,7	0,6	2,9	0,75	0,49	2,6	2,45	0,15	0,2	0,18
Dy	3,6	3,5	0,58	2,95	2,6	2,47	2,4	1,9	2,0	2,4
Но	1,0	1,2	0,92	0,97	0,94	0,9	0,87	0,7	0,8	0,75
Er	2,6	2,5	2,3	2,4	2,1	2,2	2,3	1,9	2,0	1,95
Im	0,5	0,6	0,42	0,62	0,38	0,3	0,32	0,14	0,15	0,16
Yb	4,9	5,5	2,5	2,55	1,4	1,5	1,4	0,9	1,1	0,96
Lu	0,4	0,3	0,5	0,5	0,3	0,25	0,24	0,16	0,18	0,15
Ht	3,0	3,1	3,1	2,3	3,2	3,3	3,4	2,6	2,/	2,5
	0,5	0,51	0,48	0,43	0,49	0,63	0,/	0,9	1,2	0,85
Ih	2,2	2,1	4,8	4,5	5,8	6,4	1,2	6,8	/,/	/,8
U A.:	0,8	0,/	1,2	1,3	102	1,8	1,0	1,9	1,8	3,9
AU D:	1.0	130	C0	17		//	0.0	94		90
	1,0	2,0	0,8	I,/   E 7	3,8 12.7	0,3	0,6	1,3	2,9	1,2
	),I	0,0	0.05	0.20	0.20	0.20	0 22	0.00		
	0,30	0,33	0,25	0,29	162.2	0,28	07.6	0,28	0,23	0,5
Ba/In	114,/	15 7	16.6	ש,כי כבר	222	22 6	16.7	7 0	7.05	75
Sm /Th	1.2,0	1.2,7	0.0	0 0 0	0.6	0.38	0.51	0.1/	0.16	0.12
	1,00	1,00	0,0	0,50	0,0	0,50	1 0,01	0,14	0,10	

Примечание.  $Fe_2O_3t - суммарное железо;$  значения редкоземельных элементов (РЗЭ) нормированы по хондриту по [6]. Породы Макарьевского ареала: 1–2 – габбро; 3–4 – диориты; 5–6 – тоналиты; 7 – трондъемит; 8–10 – лейкограниты. Note.  $Fe_2O_3t - totaliron;$  rareearthelements (REE) valuesarechondritenormedby [6]. The rocks of Makarevskii range: 1–2 – gabbro; 3–4 – diorites; 5–6 – tonalities; 7 – trondhjemites; 8–10 – leucogranites.

трации иттрия (менее 18 г/т), иттербия (менее 1,8 г/т), повышенные содержания ванадия и хрома, высокие нормированные к хондриту отношения лантана к иттербию (более 8–10), указывающие на сильно дифференцированный тип распределения РЗЭ в породах. В тоналитах, трондъемитах и лейкогранитах Макарьевского ареала концентрации иттрия варьируют от 10,5 до 15,1, иттербия – от 0,9 до 1,5, отношения (La/Yb)<sub>N</sub> – от 13,1 до 19,8. Кроме повышенных содержаний ванадия и хрома, в породных типах ареала отмечаются повышенные концентрации скандия и никеля и пониженные концентрации MgO (0,17–2,1).

По соотношению Sr/Y-Y кислые породные типы Макарьевского ареала попадают в поле адакитов (рис. 2).



**Рис. 2.** Диаграмма Sr/Y<sup>-</sup>Y по [8] для кислых пород Макарьевского ареала усть-беловского комплекса: Adakitic – адакиты; Typical Arcrocks – типичные островодужные породы. 1 – тоналиты; 2 – трондъемиты; 3 – лейкограниты

**Fig. 2.** Sr/Y-Y diagram by [8] for acidic rocks of Makarevskii range of Ust-Belovskii complex: 1 - tonalities; 2 trondhjemites; 3 - leucogranites

На диаграмме Sr–K/Rb–(SiO<sub>2</sub>/MgO)·100 фигуративные точки кислых разностей пород попадают в поле высококремнистых адакитов (рис. 3).

Соотношение нормированных отношений  $(La/Yb)_{N}$ -Yb<sub>N</sub> показывает, что породные типы адакитовых гранитоидов Макарьевскго ареала образуют тренд от нормальных низко-глинозёмистых тоналит-трондъемиит-дацитов (тоналиты) к адакитовым высоко-глинозёмистым тоналит-трондъемит-дацитам (трондъемиты и лейкограниты) с понижением степени частичного плавления 10 % гранатового амфиболита (рис. 4). Степень частичного плавления родоначального гранатового амфиболита превышала 50 % для тоналитов, а для трондъемитов и лейкогранитов, а для трондъемитов и лейкогранитов – менее 50 %.

В породах Макарьевского ареала усть-беловского комплекса проявлены 2 типа тетрадного эффекта фракционирования (ТЭФ) редкоземельных элементов: М-тип со значимыми величинами, превышающими 1,1, и W-тип со значимыми величинами менее 0,9 [10].



- Рис. 3. Диаграмма Sr−K/Rb−(SiO₂/MgO)•100 по [9] для адакитовых гранитоидов Макарьевского ареала. Поля адакитов: I – высококремнистых, II – низкокремнистых. Остальные условные обозначения – на рис. 2
- **Fig. 3.** Sr-K/Rb-(SiO<sub>2</sub>/MgO)·100 diagram by [9] for adakiticgranitoids of Makarevskii range. I – High silica adakite, II – low silica adakite. The legend is in Fig. 2



- Рис. 4. Диаграмма (La/Yb)<sub>N</sub>−Yb<sub>N</sub> по [11, 12] для гранитоидов Макарьевского ареала Adakitichigh-AlTTD – адакиты высоко-Al тоналит-трондьемит-дацитовые; Normal and esite and low-AlTTD – нормальные андезиты и низко-Al тоналит-трондьемит-дацитовые. MORB – океанические базальты изофиолитового блока пояса Мина-Льюпо [12]; eclogite – эклогиты; 25 % garnet amphibolites – 25 % гранатового амфиболита; 10 % garnet amphibolites – 10 % гранатового амфиболита.Условные обозначения – на рис. 1.
- **Fig. 4.** (La/Yb)<sub>N</sub>−Yb<sub>N</sub> diagram by [11, 12] for granitoids of Makarevskii range. The legend is in Fig. 2.

Следует указать, что оба типа ТЭФ РЗЭ со значимыми величинами отмечаются в породах от диоритов до лейкогранитов, то есть во всех дериватах смешанного типа и заключительных фазах с преобладанием адакитовых меток, выявляемых по геохимическим данным (табл. 2).Одновременное проявление двух типов ТЭФ РЗЭ обусловлено аномальными параметрами флюидного режима магматогенных флюидов и значительной активностью таких летучих компонентов, как F, Cl, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и других [4]. Таблица 2. Отношения элементов и значения ТЭФ РЗЭ в адакитовых гранитоидах Макарьевского ареала усть-беловского комплекса

 
 Table 2.
 Ratio of elements and values of tetrad effect of REE fractionation in adakitic granitoids of Makarevskii range of Ust-Belovskii complex

Отношения элементов и значения ТЭФ в породах Ratio of elements and values of TEF in rocks	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Отношения в хон- дритах Ratio in chondrites
Y/Ho	22,6	19,0	25,4	27,6	15,7	16,8	18,0	15,0	14,0	15,2	29,0
Zr/Hf	15,0	15,2	15,8	26,9	35,9	29,7	30,0	25,0	25,9	28,4	36,0
La/Nb	4,1	4,0	6,5	2,9	3,5	3,4	5,1	3,6	3,5	3,8	30,75
La/Ta	46,6	45,0	44,6	51,4	59,4	47,3	60,1	25,6	18,3	28,5	17,57
Sr/Eu	223	238	300	286	463	877	507	391	336	443	100,5
Eu/Eu*	1,16	1,11	1,21	1,14	0,97	0,99	1,05	0,67	0,54	0,58	0,32
Sr/Y	12,8	12,4	14,1	11,7	29,7	28,5	27,8	8,6	8,4	8,2	4,62
TE1,3	1,04	0,97	1,3	1,01	0,83	2,87	1,8	1,07	0,84	1,11	_

Примечание. ТЕ<sub>1.3</sub> − ТЭФ РЗЭ (среднее между первой и третьей тетрадами) по В. Ирбер [13]; Еи\*=(Sm<sub>1</sub>+Gd<sub>N</sub>)/2. Значения в хондритах приняты по [6]. Породы Макарьевского ареала: 1− 2 − габбро; 3−4 − диориты; 5−6 −тоналиты; 7 −трондъемит; 8−10 − лейкограниты.

Note.  $TE_{1,3} - REETEF$  (averagebetweenthefirstandthethirdtetrads) by V. Irber [13];  $Eu^*=(Sm_N+Gd_N)/2$ . Values in chondrites are taken by [6]. TherocksofMakarevskiirange: 1-2 - gabbro; 3-4 - diorites; 5-6 - tonalities; 7 - trondhjemites; 8-10 - leucogranites.

Показательны соотношения Zr/Hf к ТЭФ РЗЭ. На диаграмме просматриваются два тренда: 1) тренд увеличения значений ТЭФ РЗЭ М-типа с увеличением отношений Zr/Hf; 2) тренд уменьшения ТЭФ РЗЭ W-типа с увеличением отношений Zr/Hf (рис. 5). Эти тренды указывают на сильно дифференцированный тип распределения элементов в породах.

Втабл. 2 приведены также показательные отношения элементов в сравнении с хондритовыми, которые указывают значительные вариации отношений относительно хондритовых. Часть отношений имеют величины ниже хондритовых (Y/Ho, Zr/Hf, La/Nb), другие отношения элементов имеют величины выше хондритовых (La/Ta, Sr/Eu, Sr/Y). Отношение Eu/Eu\* имеет величины и выше, и ниже хондритовых. Негативные отношения Eu/Eu\* характерны для заключительных дериватов.

Значительная трансформация концентраций элементов и их соотношений в породах подтверждается также на диаграмме соотношений Y/Ho иZr/Hf (рис. 6). На диаграмме видно, что фигуративные точки составов пород локализуются за пределами поля CHARAC (CHArge-and-Radius-Controlled – заряд–радиус контролируемые соотношения) [15], указывая, чтоэлементы с одинаковым ионным радиусом и зарядом (пары Y–Ho и Zr–Hf) экстремально не когерентны в расплавах и ранних, и поздних фаз Макарьевского ареала, что связано с аномальной флюидонасыщенностью родоначальных расплавов [5].



**Рис. 5.** Диаграмма соотношений Zr/Hf-TE<sub>1.3</sub> по [14] с добавлениями автора для пород Макарьевского ареала усть-беловского комплекса. Породы Макарьевского ареала: 1 – габбро; 2 – диориты; 3 – тоналиты; 4 – трондъемит; 5 – лейкограниты





**Рис. 6.** Диаграмма Zr/Hf-Y/Ho для пород Макарьевского ареала. Серое поле HARAC (CHArge-and-Radius-Controlled) на диаграмме выделено по [15]. Условные обозначения – на рис. 5

**Fig. 6.** Zr/Hf-Y/Ho diagram for rocks of Makarevskii range.Gray field HARAC (CHArge-and-Radius-Controlled) is marked by [15]. The legendisin Fig. 5

#### Интерпретация результатов

Характер зональности интрузивов интерпретируется как результат химической дифференциации и скорости поступления последовательных фаз из глубинногоочага. В случае быстрого поступления фаз и отдельных пульсаций предыдущие поступления не успевают закристаллизоваться и более поздние фазы их легко прорывают и располагаются в центре плутонов с формированием нормальной зональности. Такому сценарию отвечает формирование интрузивов Макарьевского ареала.

Высокие отношения Ba/Th (>114) и Ba/La (>15), атакже низкие содержания Th и Th/Yb, Sm/Th (1,86) в габброидах подтверждают, что мафические породы Макарьевского ареала, вероятно, были генерированы частичным плавлением слэба, представленного флюид-метасоматизированныммантийным перидотитом, как это было установлено для ранне-палеозойских плутонов на северо-западе Китайского Тянь-Шаня, показывающих близкие геохимические характеристики к таковым габброидовМакарьевского ареала [16]. Габброиды имеютнизкие Sr/Y (12,4–12,8),  $(La/Yb)_{N}$  (3,0-3,1), но высокие концентрации Y, Sc, тяжёлых РЗЭ, что позволяет связывать их образование с плавлением литосферного мантийного источника без остаточного граната.

Диоритоидные разностиМакарьевского ареала, вероятно, представляют собой смешанные образованиябазальтоидов и адакитовых расплавов, а тоналиты, трондъемиты и лейкограниты заключительных фаз – в большей степени дериватами адакитовых расплавов и в меньшей степени–смешанного источника.

Генерация высококремнистыхадакитов связана с прямым плавлением субдуцируемой океанической коры, преобразованной в ходе погружения в амфиболиты или эклогиты [16–19]. Для адакитовых гранитоидов Макарьевского ареала реставрируется высокая степень частичного плавления 10 % гранатового амфиболита. Ассоциация габброидов и адакитовых гранитоидовусть-беловского комплекса широко распространена не только в Горном Алтае, но и в Рудном Алтае (Междуреченский, Локтевский ареалы). Это событие в интервале 349–371 млн лет назад связывается с коровым утолщением, инициированным подтоком мантийно-производных магм базальтоидного состава на большой площади.

Высокая флюидо-насыщенность расплавов усть-беловского комплекса (Бащелак, Чикетаман, Мурзинка, Эдиган) выдерживается повсеместно на территории Горного Алтая [20]. Она свойственна и глубинному очагу Макарьевского ареала, что вызывало значительные трансформации в соотношениях различных элементов вплоть допроявления: 1 – заряд-радиус неконтролируемого поведения элементов в расплавах; 2 – двух типов ТЭФ РЗЭ (М и W).

Такие особенности поведения химических элементов в породах имеют отношение к рудоносности гранитоидов Макарьевского ареала. Соотношение концентраций золота и величины тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ отражено на рис. 7. На диаграмме отчётливо видны два тренда изменения ТЭФ РЗЭ: увеличение величины ТЭФ РЗЭ М-типа не влияет на содержания золота в расплаве. Уменьшение величины ТЭФ РЗЭ W-типа влечёт за собой увеличение концентраций золота в расплавах. Как показано нами ранее, концентрации золота в расплавах и последующее отделение в гидротермальныерастворы зависит в значительной степени от физико-химических условий магматогенных флюидов, их состава и эволюции [21–23]. В то же время проявление ТЭФ РЗЭ также связано с составом флюидов и особенностями кислотности-щёлочности среды [21, 23].

Указанные закономерности определили и реальную металлогеническую роль петролого-геохимических особенностей глубинного очага, создавшего многообразные породные типы Макарьевского ареала. Пространственно и парагенетически с Сосновским массивом гранодиоритови тоналитовусть-беловского комплекса связано разобщенное оруденение золота, локализованное в гранитоидахв кварц-сульфидных жилах с содержанием золота от 1 до 1,8 г/т и в скарнированных породах барагашской свиты в экзоконтакте массива с содержанием золота 0,5 г/т в ассоциации с вольфрамом 0,001 %, а также шлиховыми потоками с единичными знаками золота. Здесь же в экзоконтактовой части массива известна непромышленная россыпь р. Погорелка, разведанная в 1851 и 1890 гг. на протяжении 0,5 км. Содержание золота на пески – от знаков до 0,76 г/м<sup>3</sup>. Восточнее с гранодиоритамиусть-беловского комплекса Щемиловского массива пространственно совпадают аллювиальные долинные россыпи р.



**Рис. 7.** Диаграмма Au<sup>-</sup>TE<sub>1,3</sub> для пород Макарьевского ареала. Содержания золота в хондритах по [24] **Fig. 7.** Au<sup>-</sup>TE<sub>1,3</sub> diagramfor rocks of Makarevskii range. Gold contents in hondritesis by [24]. The legendis in Fig. 5

Щемиловки (Б. Щемиловки) и р. Каменки. Первая разрабатывалась, остаётся недоразведанной. Золото крупное, плохо окатанное. Запасы – 5,5 кг категории B+C<sub>1</sub>. *Россыпь р. Каменки* разведывалась и частично эксплуатировалась в 1937–1938 гг. Максимальное содержание золота в шурфах – до 2 г/м<sup>3</sup>.

В южной части Батунковского вольфрамового месторождения вблизи контакта тоналитовустьбеловского комплекса в зоне окварцевания с обильным пиритом по терригенным породам барагашскойсвиты определены содержания золота от 0,9 до 3,5 г/т.

На Лысухинском медно-золото-скарновом проявлении в контакте с тоналитамиусть-беловского комплекса одноименного массива определены содержания золота от 0,5 до 2,1 г/т, серебра – от 15 до 45 г/т.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Коробейников А.Ф., Гусев А.И., Русанов Г.Г. Петрология и золотоносность адакитовых гранитоидов Калбы // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 3. – С. 31–38.
- Гусев А.И. Минерагения и полезные ископаемые Алтайского края. – Бийск: Изд-во ГОУВПО АГАО, 2011. –365 с.
- Владимиров А.Г., Шокальский С.П., Пономарёва А.П. Позднепалеозойский-раннемезозойский гранитоидный магматизм и проблема рифтового этапа тектогенеза в Горном Алтае / Геологическое строение и полезные ископаемые западной части Алтае-Саянской горной области. – Новокузнецк: Изд-во Южсибгеолкома, 1995. – С. 186–189.
- Владимиров А.Г., Руднев С.Н. Изотопное датирование рудоносных магматических и метаморфических комплексов Алтае-Саянской складчатой области для Госгеолкарты-1000. – Новосибирск: Изд-во «Дом печати СО РАН». Отделение «ГЕО», 2002. – 307 с.

#### Заключение

Гранитоиды Макарьевского ареала по комплексу признаков относятся к адакитовому типу. Их формирование связано с плавлением 10 % гранатового амфиболита субдуцируемой океанической коры. Степень частичного плавления составляла 50 % и менее. Ассоциация габброидов и адакитовых гранитоидов и смешение различных по составу расплавов свидетельствует о коровом утолщении, вызванном подтоком со значительных глубин мантийно-производных магм базальтоидного состава. В породах проявлены два типа ТЭФ РЗЭ и заряд-радиус неконтролируемое поведение многих химических элементов в расплавах. С гранодиоритами и тоналитами некоторых массивов Макарьевского ареала пространственно и парагенетически связано жильное золото-сульфдно-кварцевое и скарновое медно-золоторудное оруденение.

- Experimental simulation of magma mixing at high pressure / M. Laumonier, B. Scaillet, L. Arbaret, R. Champallier // Lithos. - 2014. - V. 196. - P. 281-300.
- Anders E., Greevese N. Abundances of the elements: meteoric and solar // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1989. – V. 53. – P. 197–214.
- Middle Jurassic to Cenozoic evolution of arc magmatism during Neotethyssubduction and arc-continent collision in the Kapan Zone, Southern Armenia / J. Mederer, R. Moritz, A. Ulianov, M. Chiaradia // Lithos. - 2013. - V. 177. - P. 61-78.
- BarbarinB. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments // Lithos. – 1999. – V. 46.– P. 605–626.
- Martin H., Smithies R.H., Rapp R.An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution // Lithos. – 2005. – V. 79. – P. 1–24.
- 10. Tetrad effect in rare earth element distribution patterns: a method of quantification with application to rock and mineral

samples from granite-related rare metal deposits / T. Monecke, U. Kempe, J. Monecke, M. Sala, D. Wolf // Geochim. Cosmochim. Acta. - 2002. - V.66. - № 7. - P. 1185-1196.

- DrummondM.S., Defant M.J.A model for trondhjemite-tonalitedacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons // J. Geophys. Res. - 1990. - V. 95. -P. 21503-21521.
- 12. The Discovery of the High Depleted N-MORB-type Volcanic Rocks: New Evidence for Paleo Ocean of Mian-Lue / J.-F. Xu, X.Y. Yu, X.H. Li, Y.W. Han, J.H. Yu, J.H. Shen, B.R. Zhang // Chinese Science Bulletin. - 1998. - V. 43. - № 6. - P. 510-514.
- Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu\*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites // Geochim. Comochim. Acta. - 1999. -V. 63. - № 3/4. - P. 49-71.
- 14. JahnB., Wu F., Capdevila R. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: the Wodue and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China // Lithos. – 2001. – V. 59. – P. 171–198.
- Bau M., Dulski P. Comparative study of yttrium and rare-element behaviours in fluorine-rich hydrothermal fluids // Contrib. Mineral. Petrol. – 1995. – V.119. – P. 213–223.
- Geochemistry, zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotopes on early Paleozoic plutons in the northwestern Chinese Tianshan: Petrogenesis and geological implications / Z. Huang, X. Long, A. Kröner, Ch. Yuan, Q. Wang, G. Sun, G. Zhao, Y. Wang // Lithos. – 2013. – V. 182. – P. 48–66.

- DefantM.J., Drummond M.S.Derivation of some modern arc magmas by melting of young subductedlitosphere // Nature. – 1990. – V. 347. – № 4.– P. 662–665.
- KayR.W. Aleutian magnesianandesites: melts from subducted Pacific Ocean crust // J. Volcanol. Geotherm. Res. - 1978. -V. 4. - P. 117-132.
- MartinH.Adakitic magmas: modern analogues of Archaeangranitoids // Lithos. - 1999. - V.46. - P. 411-429.
- ГусевА.И. Петрологияадакитовыхгранитоидов. М.: Изд-во-РАЕ, 2014. – 152 с.
- Коробейников А.Ф., Ананьев Ю.С., Гусев А.И. Мантийно-коровые рудообразующие системы, концентрирующие благородные металлы. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 262 с.
- Гусев А.И., Табакаева Е.М. Критерии продуктивных магматических комплексов Алтайского региона на золотое оруденение. Бийск: Изд-во АГАО, 2014. 145 с.
- Гусев А.И., Гусев Н.И. Анорогенные гранитоиды: петрология, геохимия, флюидный режим. – Бийск: Изд-во АГАО, 2014. – 202 с.
- Sun S.S. Chemical composition and origin of the earth's primitivemantle //Geochim. Cosmochim. Acta. 1982. V. 46. P. 179-192.

Поступила 25.03.2015 г.

UDC 552.3:550.4:550.42:550.93

# PETROLOGY AND GOLD CONTENT OF ADAKITIC GRANITOIDS OF UST-BELOVSKII COMPLEX IN MAKAREVSKII RANGE OF GORNY ALTAI

# Anatoliy I. Gusev,

Shukshin Altai State Academy of Education, 11, Sovetskayastreet, Biysk, 659333, Russia. E- mail: anzerg@mail.ru

## Aleksandr F. Korobeynikov,

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

**The relevance** of the discussed issue is caused by the need of researching petro-geochemistry and petrologic peculiarities of gabbrogranitoid massifs of Makarevskii range which are related spatially to gold occurrence.

**The main aim of the research** is to study geological, petrological, geochemical features of all rock types of Ust-Belovskii complex in the range using canonic classification and experimental diagrams, which allow solving genetic problems.

**The methods used in the study.** Rare and scattered elements were determined in rocks by inductively coupled plasma method on the mass spectrometry «OPTIMA-4300», for Cu, Zn, Pb, Li – by the methods of ISP-AES, the rest elements, including REE, were determined by ISP-MS methods in the VSEGEI Laboratory (St-Petersburg). Absolute age of granitoids was defined by U-Pb method SHRIMP II by zircon in the VSEGEI Laboratory (St-Petersburg). Gold and bismuth were defined by the neutron-activation method in the Laboratory OI-GaG SO RAN (Novosibirsk).

**Results.** The authors have corrected the absolute age of granitoids formation in Ust-Belovskii complexin Makarevskii range, it is 349?353±12,0 for Sosnovskii and Makarevskii massifs. The paper describes a direct zoning in intrusive massifs formation. 5 phases were detached in composition of intrusive: gabbro, diorites, tonalities, trondhjemites, leucogranites. More evolution phases of leucogranites are located in the center of massif but early gabbros are on the periphery. The authors estimated different petrochemical coefficients, indices, modules for the rocks of the complex used for decoding the genesis. Granitoids of range refer to high silica adakiticgranitoids. The ratios of strontium isotopes (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr for granodiorites of Makarevskii massif is 0,711(0,712) are identified by mantle nature of melts, formed with crust material contamination. Gabbro of early phase of Makarevskii range were probably generated by partial melting of slab, represented by fluid-metasomatized mantle peridotite. More late derivatesare indebted to mixing of basaltic and adakitic parent magmas. Generation of high silica adakites is related to direct melting of subducted oceanic crust, transformed at immersion in to amphibolites and eclogites. Adakiticgranitoids of Makarevskii range were formed by partial melting (melting degrees is about 50 %) of 10 % garnet amphibolites. High fluid-saturation of melts resulted in transformation of ratios of many elements at occurrence of tetradic effect of M- and W-types REE fractionation. The paper indicates the space and paragenetic relation of different types of gold ore mineralization with granitoids of Makarevskii range.

#### Key words:

Gabbro, diorites, tonalities, trondhjemites, leucogranites, high silica adakite, melting of fluid-metasomatized peridotite, partial melting of garnet amphibolite, mixing of magmas, tetradic effect of REE fractioning, gold ore mineralization.

#### REFERENCES

- Korobeynikov A.F, Gusev A.I., Rusanov G.G. Petrologiya i zolotosnost adakitovykh granitoidov Kalby [Petrology and ash-content of adakitic granitoids of Kalba]. Bulletin of theTomsk Polytechnic University, 2010, vol. 316, no. 1, pp. 31–38.
- 2. Gusev A.I. *Minerageniya i poleznye iskopaemye Altayskogo kraya* [Miberageny and mineral resources in Altai region]. Biysk, SEUHPE ASAE Press, 2011. 365 p.
- Vladimirov A.G., Shokalskiy S.P., Ponomareva A.P. Pozdnepaleozoyskiy-rannemezozoyskiy granitoidny magmatizm i problema riftovogo etapa tektogeneza v Gornom Altae [Late Paleozoic-Early mezazoic granitoid magmatism and the problem of rift stage of tectogenesis in Gorni Altay]. Geologicheskoe stroenie i poleznye iskopaemye zapadnoy chaste Altae-Sayanskoy gornoy oblasti [Geological structure and mineral resources in western part of Altai-Sayan mountain region]. Novokuznetsk, Yuzhsibgeolk Press, 1995. pp. 186-189.
- Vladimirov A.G., Rudnev S.N. Izotopnoe datirovanie rudonosnykh magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov Altae-Sayanskoy skladchatoy oblasti dlya Gosgeolkarty-1000 [Isotopic dating of ore-bearing magmatic and metamorphic complexes in Altai-Sayan folded area for Gosgeolkart-1000]. Novosibirsk, SB RAS Press, 2002. 307 p.
- Laumonier M., Scaillet B., Arbaret L., Champallier R. Experimental simulation of magma mixing at high pressure. *Lithos*, 2014, vol. 196, pp. 281-300.

- AndersE., Greevese N.Abundances of the elements: meteoric and solar. Geochim. Cosmochim. Acta., 1989, vol. 53, pp. 197–214.
- Mederer J., Moritz R., Ulianov A., Chiaradia M. Middle Jurassic to Cenozoic evolution of arc magmatism during Neotethyssubduction and arc-continent collision in the Kapan Zone, Southern Armenia. *Lithos*, 2013, vol. 177, pp. 61–78.
- 8. BarbarinB. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 1999, vol. 46, pp. 605–626.
- Martin H., Smithies R.H., Rapp R.An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 2005, vol. 79, pp. 1–24.
- MoneckeT., Kempe U., Monecke J., Sala M., Wolf D.Tetrad effect in rare earth element distribution patterns: A method of quantification with application to rock and mineral samples from granite-related rare metal deposits. *Geochim.Cosmochim.Acta.*, 2002, vol. 66, no. 7, pp. 1185–1196.
- DrummondM.S., Defant M.J.A model for trondhjemite-tonalitedacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. J. *Geophys. Res.*, 1990, vol. 95, pp. 21503-21521.
- Xu J.-F., Yu X.Y., Li X.H., Han Y.W., Yu J.H., Shen J.H., Zhang B.R. The Discovery of the High Depleted N-MORB-type Volcanic Rocks: New Evidence for Paleo Ocean of Mian-Lue.*Chinese Science Bulletin*, 1998, vol. 43, no. 6, pp. 510–514.

- Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu\*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. *Geochim. Comochim. Acta.*, 1999, vol. 63, no. 3/4, pp. 49-71.
- 14. Jahn B., Wu F., Capdevila R. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: the Wodue and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China. *Lithos*, 2001, vol. 59, pp. 171–198.
- Bau M., Dulski P. Comparative study of yttrium and rare-element behaviours in fluorine-rich hydrothermal fluids. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1995, vol.119, pp. 213–223.
- Huang Z., Long X., Kröner A., Yuan Ch., Wang Q., Sun G., Zhao G., Wang Y. Geochemistry, zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotopes od early Paleozoic plutons in the northwestern Chinese Tianshan: Petrogenesis and geological implications. *Lithos*, 2013, vol. 182, pp. 48–66.
- Defant M.J., Drummond M.S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subductedlithosphere. *Nature*, 1990, vol. 347, no. 4, pp. 662-665.
- Kay R.W. Aleutian magnesian andesites: melts from subducted Pacific Ocean crust. J. Volcanol. Geotherm. Res., 1978, vol. 4, pp. 117-132.

- Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. Lithos, 1999, vol. 46, pp. 411-429.
- Gusev A.I. Petrologiya adakitovykh granitoidov [Petrology of adakitic granitoids]. Moscow, RAE Press, 2014. 152 p.
- Korobeynikov A.F, Ananev Yu.S., Gusev A.I. Mantiyno korovye rudoobrazuyuschie sistemy, kontsentriruyushchie blagorodnye metally [Mantle-crust ore-forming systems with noble metal concentration]. Tomsk, TPU Publ. house, 2012. 262 p.
- 22. Gusev A.I., Tabakaeva E.M. Kriterii produktivnykh magamaticheskikh kompleksov Altaiskogo regiona na zolotoe orudenenie [Criteria of influence of productive magmatic complexes in Altaisk region on ore-grade gold mineralization]. Biysk, ASAE Press, 2014.145 p.
- Gusev A.I., Gusev N.I. Anorogennye granitoidy: petrologiya, geokhimiya, fluidny rezhim [Anorogenic granitoids: petrology, geochemistry, fluid mode]. Biysk, ASAE Press, 2014. 202 p.
- Sun S.S. Chemical composition and origin of the earth's primitivemantle. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1982, vol. 46, pp. 179-192.

Received: 25 March 2015.

УДК 571:556.388.2

# ОБОСНОВАНИЕ ГРАНИЦ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ ВОДОЗАБОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ НА ПРИМЕРЕ Г. ЮЖНО-САХАЛИНСКА

# Сахаров Валерий Александрович,

канд. геол.-минерал. наук, заведующий лабораторией физико-химических исследований Сахалинского государственного университета, Россия, 693008, г. Южно-Сахалинск, ул. Ленина, д. 290. E-mail: sakhsakh@yandex.ru

#### Морозова Ольга Анатольевна,

науч. сотр. лаборатории физико-химических исследований Сахалинского государственного университета, Россия, 693008, г. Южно-Сахалинск, ул. Ленина, д. 290. E-mail:sgi84@mail.ru

# Жукова Юлия Андреевна,

студентка кафедры геологии и природопользования Сахалинского государственного университета, Россия, 693008, г. Южно-Сахалинск, ул. Ленина, д. 290. E-mail: yulia.zhukowa@mail.ru

**Актуальность работы** обусловлена существованием необходимости установления особых условий землепользования в пределах зон санитарной охраны водозаборов подземных вод согласно действующим нормативным актам. Границы зон санитарной охраны второго и третьего поясов определяются расчетным путем для условного инертного трассера без учета нейтрализующих (обезвреживающих) факторов. В то же время природный гидроминеральный комплекс, в определенных условиях, обладает способностью задерживать и разлагать загрязняющие вещества, не позволяя поллютантам мигрировать на значительные расстояния. После проведения необходимых исследований размеры зон санитарной охраны можно сократить до минимально необходимых без ущерба для безопасности эксплуатации водозаборов. Это весьма актуально для населенных пунктов, на территориях которых имеются водозаборы подземных вод.

**Цель работы:** определение реальных размеров границ зон санитарной охраны водозаборов подземных вод с учетом способности гидроминерального комплекса препятствовать миграции загрязняющих веществ из поверхностных источников загрязнения по водоносным горизонтам и комплексам.

**Методы исследования:** лабораторное определение минералогического состава, валового содержания органических веществ и белка, определение емкости поглощения и состава обменного комплекса, состава поровых растворов и легкорастворимых солей, валового содержания фосфора и мышьяка в породах зоны аэрации и водовмещающих породах и химического состава подземных вод, включая микрокомпоненты. Лабораторные исследования направленности и интенсивности микробиологических процессов.

**Результаты.** Сделан вывод о блокировании геологической средой распространения поллютантов из поверхностных источников загрязнения в непосредственной близости от самих источников. Определены возможности природной микробной популяции в деструкции органических загрязнителей. Рекомендовано на территории Сусунайского артезианского бассейна устанавливать границы зон санитарной охраны второго и третьего поясов в пределах границы зоны санитарной охраны ворого и третьего поясов в пределах границы зоны санитарной охраны второго и третьего поясов в пределах границы зоны санитарной охраны второго и третьего поясов в пределах границы зоны санитарной охраны первого пояса.

#### Ключевые слова:

Зона санитарной охраны, источник загрязнения, гидроминеральный комплекс, автотрофный процесс, гетеротрофный процесс, микробиологический барьер, обменная емкость пород.

Санитарно-эпидемиологические требования к организации и эксплуатации зон санитарной охраны (ЗСО) источников водоснабжения и водопроводов питьевого назначения установлены СанПиН 2.1.4.1110-02 «Зоны санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов питьевого назначения» [1]. Согласно этому документу размеры границ первого пояса фиксированы, размеры границы второго и третьего поясов определяются расчетным методом. Наиболее часто расчеты выполняются по методике, изложенной в [2, 3]. При этом не учитываются природные факторы, препятствующие миграции возможных поллютантов с поверхности земли к фильтрам водозаборных скважин [4]. Расчетные площади ЗСО имеют огромные размеры, и, если соблюдать санитарные нормы, на значительные территории должны быть наложены сервитуты, ограничивающие виды землепользования. Как правило, на городских территориях выдержать регламенты в ЗСО не представляется возможным [5, 6]. Таким образом, возникает правовые противоречия между сложившимся землепользованием и требованиями к санитарному содержанию ЗСО [7, 8].

Не исключением является и город Южно-Сахалинск. В пределах городской черты расположено более 200 водозаборов подземных вод хозяйственно-питьевого назначения, и, если нанести на карту города границы ЗСО всех водозаборов, практически на всю территорию должны быть наложены соответствующие ограничения землепользования. Однако сложившаяся ситуация остается неизменной на протяжении десятков лет. Вместе с тем не было ни одного случая запредельного загрязнения подземных вод на водозаборах, несмотря на, мягко говоря, неудовлетворительное санитарное состояние значительной части городской территории. Причиной этого, очевидно, является высокая самоочищающая способность гидроминерального комплекса.

Для оценки способности гидроминерального комплекса препятствовать распространению загрязнения в подземных водах в настоящей работе обобщены результаты многолетних гидрогеологических исследований, выполненных на территории города под руководством и при участии авторов.

Цель работ – определение реальных размеров границ ЗСО водозаборов подземных вод с учетом способности гидроминерального комплекса препятствовать миграции загрязняющих веществ из поверхностных источников загрязнения по водоносным горизонтам и комплексам.

В административном отношении район исследований расположен на территории города Южно-Сахалинска Сахалинской области, в гидрогеологическом – в пределах Сусунайского межгорного артезианского бассейна второго порядка Сахалинской гидрогеологической складчатой области.

Чехол бассейна сложен рыхлыми и слабоуплотненными отложениями палеоген-неогенового и четвертичного возраста. Фундамент и борта Сусунайского артезианского бассейна сложены метаморфизованными интенсивно дислоцированными хлоритовыми сланцами, кварцитами позднемезозойского возраста.

Особенностями бассейна является значительное превышение областей питания над областями и очагами разгрузки подземных вод. Это определяет наличие значительных гидростатических напоров, в результате которых многие скважины являются самоизливающими. Региональной областью разгрузки подземных вод является море, местной – реки, ручьи, вышележащие водоносные горизонты и комплексы.

Глубина залегания уровня подземных вод в центре низменности не превышает 1–3 м, увеличиваясь в прибортовых частях до 10 м и более. Ниже развиты напорные пластово-поровые воды, приуроченные к сравнительно выдержанным, этажно залегающим пластам галечников, песков, песчаников, разделенных прослоями глин, суглинков, супесей, приуроченных к неоплейстоценовым и слабо литифицированным неогеновым отложениям. Пьезометрические уровни устанавливаются на большей части территории выше земной поверхности и лишь в первых от поверхности одном-двух водоносных пластах могут устанавливаться ниже поверхности земли.

В палеогеновых и верхнемеловых отложениях воды напорные порово-пластовые. Значительно меньше распространены в этих отложениях безнапорные трещинные воды зоны выветривания. В вулканогенно-осадочных нерасчлененных палеоцен-мезозойских и мезозойских образованиях развиты напорные трещинные воды.

Воды, как напорные, так и грунтовые, пресные, по преобладающим ионам гидрокарбонатные кальциевые или натриевые. Изучение динамики химического состава подземных вод проводилось в процессе многолетнего мониторинга по стандартной методике.

Детальное изучение и картирование техногенных источников загрязнения выполнялось посредством сплошного маршрутного обследования территории города.

Изучение самоочищающей способности гидроминерального комплекса выполнялось посредством лабораторных определений физико-химических свойств водовмещающих пород и пород зоны аэрации, а также активности микробиологических процессов. Исследования проводились в районах расположения жижесборников («у источника»), в удалении от сосредоточенных источников загрязнения («вне источника») и на площадке водозабора «Луговое» («на водозаборе»), что позволяет оценить наиболее характерные геоэкологические ситуации и обеспечивает представительность результатов.

Породы зоны аэрации и водоносного горизонта, как правило, являются средой, в которой в зависимости от состава и свойств пород при контакте их с загрязненными водами протекают те или иные физико-химические процессы (окислительно-восстановительные и тесно связанные с ними микробиологические процессы, ионный обмен, осаждение трудно растворимых солей и т. д.), приводящие к преобразованию не только химического состава загрязненных подземных вод, но и свойств горных пород. Исследуя последние, можно судить о направленности физико-химических процессов и о возможном распространении загрязнения по площади и глубине [9]. Специальные исследования по изучению самоочищающей способности природной среды выполнены в рамках оценочно-экспертных работ по изучению техногенного воздействия на подземные воды в районе водозабора «Луговое» [10] и включали:

- Бурение трех специальных опорных скважин глубиной 70 м каждая. Одна скважина расположена на площадке водозабора «Луговое» («на водозаборе»). Одна скважина относительно удалена от источников загрязнения («вне источника»). Одна скважина пройдена в непосредственной близости от жижесборников птицефабрики («у источника»).
- Определение минералогического состава образцов керна с акцентированием внимания на наиболее активной их составляющей — глинистых минералах и органических включениях.
- Определение валового содержания органических веществ в образцах керна.
- Определение емкости поглощения и состава обменного комплекса в образцах керна.
- Химический анализ водных вытяжек из образцов керна для определения состава поровых растворов и легкорастворимых солей.
- Определение валового содержания фосфора и мышьяка в образцах керна, учитывая, что фосфор и мышьяк являются индикаторами органического загрязнения.

- Определение содержания микроэлементов в пробах.
- Определение в образцах пород содержания белка, являющегося индикатором наличия в водоносном горизонте биологически активных химических элементов, таких как N, P, K, Fe, S.
- Изучение микробиологических процессов.
   Исследования проводились в районе водозабора

«Луговое», т. к. этот район наиболее хорошо изучен в гидрогеологическом отношении [11]. Также в районе расположены наиболее типичные источники загрязнения подземных вод, причем сразу за оградой водозабора расположены сельскохозяйственные угодья, на которых применяются органические и минеральные удобрения и ядохимикаты (рис. 1). В силу идентичности геолого-гидрогеологических условий результаты исследований на данной площади могут быть распространены на всю территорию Сусунайского артезианского бассейна.

# Результаты изучения влияния источников загрязнения на подземные воды

В районах расположения жижесборников и свалок бытовых отходов наблюдается загрязнение подземных вод хлоридами, гидрокарбонатами, сульфатами, железом, аммонием, органическими веществами (окисляемость). Интенсивность загрязнения достигает по железу 500 ПДК (151 мг/дм<sup>3</sup>, 60 ед. фона), по аммонию – 15 ПДК (35 мг/дм<sup>3</sup>, 35 ед. фона), по органическим веществам – 17 ПДК (84 мг/дм<sup>3</sup>, 26 ед. фона). Концентрации остальных компонентов не выходят за рамки предельно допустимых для питьевых вод [12, 13].

Загрязнение подземных вод в районе гидрозолоотвала ТЭЦ, хотя и незначительное, достигает 150 м по глубине. Оно проявляется в превышении фона по марганцу, литию, кобальту, цинку, хлоридам, нитритам и нитратам. Превышение ПДК наблюдается только по марганцу (3 ПДК). Наибольшему загрязнению подвергаются грунтовые воды [14, 15]. Загрязнение проявляется в превышении фона (единиц фона) по марганцу (до 5,7), ванадию (до 4,4), барию (до 26, 1), стронцию (до 3), кобальту (>1), меди (до 6,4), хрому (до 4,6), ртути (до 4, 4), цинку (до 4,1), свинцу (до 2,0), натрию (до 4,3), азоту аммонийному (до 1,3), кальцию (до 5,4), магнию (до 2,8), железу (до 9,8), хлоридам (до 15,3), сульфатам (до 45,5), нитритам, нитратам, гидрокарбонатам.

Детальный анализ многолетних данных позволяет сделать вывод о том, что значительное загрязнение подземных вод локализовано в грунтовом водоносном горизонте на небольшом удалении от сосредоточенных источников загрязнения [16]. По латерали концентрации загрязняющих веществ резко уменьшаются на расстоянии первых десятков метров от границы источника. По вертикали загрязнение уверенно идентифицируется на глубину до 30 м.



- Схема источников загрязнения. Потенциальные ис-Рис. 1. точники загрязнения: 1 – птицефабрика Островная. 1 очередь, производственная зона; 2 – птицефабрика Островная, 1 очередь, жижесборники; 3 - птицефабрика Островная, 2 очередь, производственная зона; 4 – птицефабрика Первомайская, производственная зона; 5 – птицефабрика Первомайская, жижесборники; 6 – свиноводческий комплекс «Сахалинский бекон», производственная зона; 7 - свиноводческий комплекс «Сахалинский бекон», жижесборники; 8 – Комплекс рогатого скота (КРС) совхоза «Комсомолец», производственная зона; 9 – Комплекс рогатого скота (КРС) совхоза «Комсомолец», жижесборники; 10 - гидрозолоотвал ТЭЦ-1; 11 - склад средств химизации сельского хозяйства; 12 – городская свалка; 13 очистные сооружения канализации (ОСК-7); 14 сельхозполя совхоза «Тепличный»; 15 сельхозполя комплекса «Сахалинский бекон»; 16 – сельхозполя совхоза «Комсомолец»; 17 - неблагоустроенный жилой фонд; 18 – производственные зоны предприятий
- Fig. 1. Pattern of pollution sources. Potential pollution sources: 1 is the island poultry plant, 1 priority, production area; 2 is the island poultry plant, 1 priority, liquid manure tanks; 3 is the island poultry plant, 2 priority, production area; 4 is the Pervomayskaya poultry plant, production area; 5 is the Pervomayskaya poultry plant, liquid manure tanks; 6 is the pig-breeding complex «Sakhalin beckon», production area; 7 is the pig-breeding complex «Sakhalin beckon», liquid manure tanks; 8 is the cattle complex of sovkhoz «Komsomolets», production area; 9 is the cattle complex of sovkhoz «Komsomolets», liquid manure tanks; 10 is the hydro-ash-disposal area TPP-1; 11 is the warehouse of agricultural chemicalization agents; 12 is the city dump; 13 is the sewage treatment facilities (STF-7); 14 is the agricultural fields of sovkhoz «Teplichny»; 15 is the agricultural fields of the complex « Sakhalin beckon»; 16 is the agricultural fields of sovkhoz « Komsomolets»; 17 is the housing without modern conveniences; 18 are the production areas of enterprises

В районах рассредоточенных источников воздействия (сельскохозяйственные угодья, неблагоустроенный жилой фонд, садоводческие товарищества) загрязнение подземных вод весьма умеренное. Наблюдается незначительное превышение фоновых концентраций отдельных компонентов химического состава.

В результате специальных исследований установлено, что литологические разности зоны аэрации и водовмещающих отложений представлены плохо отсортированным материалом: это либо глины, содержащие включения песка, гальки, гравия, либо песчано-гравийно-галечные отложения с высоким содержанием тонкодисперсного глинистого материала. Практически все слои в большей или в меньшей степени содержат органический материал как в виде плохо разложившихся растительных остатков, так и в виде гумусового вещества. Наличие в разрезе захороненных илов с большим количеством органики, а также глин и алевритов создает в водоносном горизонте восстановительные условия, что подтверждается низкими значениями величин Eh (до 100 mv), а также наличием в отложениях 2-х валентного железа в различных минеральных образованиях, придающих отложениям в целом зеленый цвет. Основными в процентном отношении глинистыми минералами являются смешаннослойные хлорит-монтмориллонитовые и гидрослюдисто-монтмориллонитовые минералы; хлорит и гидрослюда содержатся в подчиненном количестве. Из прочих минералов в тонкодисперсной фазе присутствуют кварц и полевой шпат.

Емкость поглощения глин составляет 20,6-29,8, алевритов 17,2-3,6, суглинков и супесей 12,4-21,3 мг-экв./100 г породы.

В составе обменных катионов преобладает кальций (его содержание достигает 10...20 мгэкв./100 г породы), содержание ионов натрия и калия, как правило, не превышает 1...2 мгэкв./100 г породы. Породы имеют ярко выраженный континентальный тип поглощенного комплекса, что свидетельствует о высокой степени их промытости. В целом глинистые отложения обладают достаточно высокой поглощающей способностью. Наличие органики в породах также повышает их поглощающую способность [17, 18].

Активность микробиологических процессов исследовалась в основном в грунтовом водоносном горизонте по двум профилям, представляющим наибольший интерес: первый профиль – птицефабрика – водозабор «Луговое», второй – свиноводческий комплекс – водозабор «Луговое». В результате микробиологических исследований во всех пробах обнаружены как денитрифицирующие, так и нитрифицирующие микроорганизмы. Численность денитрификаторов колебалась в пределах  $10^5...10^{10}$  кл/дм<sup>3</sup>, численность нитрификаторов –  $10^3...10^5$  кл/дм<sup>3</sup>. Результаты определения численности микроорганизмов группы кишечной палочки указывают на очень серьезное загрязнение фекальной микрофлорой проб, отобранных из скважин «у источника».

На рис. 2 в координатах скорость ассимиляции углерода ацетата - скорость ассимиляции углерода карбоната прямой линией разделены области преимущественного развития автотрофных и гетеротрофных микробиологических процессов. Линией разделен условный микробиологический процесс, в ходе которого в клетку включается 70 % углерода карбонатов и 30 % углерода ацетата, что соответствует максимальной величине ассимиляции неорганического углерода для большинства гетеротрофных микроорганизмов. Слева от прямой располагается область развития автотрофных микробиологических процессов ассимиляции углерода, справа - гетеротрофных. На рисунке видно, что около половины точек лежит в области гетеротрофных процессов, водорастворенного органического вещества. Скорость этого процесса изменяется в широком диапазоне (0,91...35,8 мкг С/дм<sup>3</sup> сутки), что указывает на значительные возможности природной микробной популяции в интенсификации процессов деструкции потока органических загрязнителей.



- Рис. 2. Взаимосвязь величин скоростей включения в клетку органического І₂ и неорганического І, углерода. (◊– водозаборные скважины; ◊ – скважины, расположенные «вне источника»; + – скважины, расположенные «у источника»; Г<sub>Ф</sub> – область распространения преимущественно гетеротрофной микрофлоры; А<sub>Ф</sub> – область распространения преимущественно автотрофной микрофлоры
- Fig. 2. Relation of the values of the rates of including organic l<sub>2</sub> and inorganic l<sub>1</sub> carbon into a cell. (◊ are the water wells; ◊ are the «out of the source» wells; + are the «near the source» wells; Γ<sub>Φ</sub> is the region of distribution of mainly heterotrophic microflora; A<sub>Φ</sub> is the region of distribution of autotrophic microflora

В области автотрофных процессов, в ходе которых скорость деструкции органического вещества незначительна, расположены скважины «вне источника». Если считать, что воды, залегающие ниже грунтовых, на участке водозабора не подвержены влиянию поверхностного загрязнения, то данные, полученные по ним, можно рассматривать как контрольные. Фоновые средние значения содержания ацетата равны 2,7 мг/дм<sup>3</sup>, изотопный состав углерода карбонатов равен 16,2 %, скорость микробиологической деструкции органического вещества 2,0 мкг С/дм<sup>3</sup>сутки. Изотопный состав углерода карбонатов грунтовых вод у источников загрязнения существенно облегчен, что объясняется процессом окисления поступающей органики в ходе микробиологических процессов деструкции веществ загрязнителей. Содержание ацетата в подземных водах у источников загрязнения выше в 8 раз, а на водозаборе – в 2 раза. Скорость ассимиляции органического углерода на водозаборе в грунтовом горизонте выше в 3 раза, а в районе источников загрязнения – в 5 раз. Практически аналогично ведет себя и величина скорости ассимиляции неорганического углерода. Все это говорит о том, что подземные воды грунтового водоносного горизонта испытывают загрязнение органическим веществом практически на всей изучаемой территории, включая площадку размещения непосредственно водозабора «Луговое». Различия наблюдаются только по интенсивности загрязнения: максимальная интенсивность - «у источника», минимальная - «вне источника» и «на водозаборе». Отсутствие или весьма незначительные концентрации ингредиентов, характерных для такого типа загрязнения (нитратов, аммония, органических веществ), фиксируемые режимными гидрогеохимическими наблюдениями, объясняется тем, что природная популяция микроорганизмов способна существенно ограничивать распространение загрязнения, т. е. создается природный микробиологический барьер на границах очаговой зоны. Причем в существующих условиях (техногенных и гидрогеологических) этот барьер имеет некоторый запас прочности, т. к. максимальная зафиксированная скорость ассимиляции органического углерода составляет 20,3...35,8 мкг С/дм<sup>3</sup>сутки, в то время как средняя «задействованная» активность микробиологических процес-

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.1.4.1110-02. «Питьевая вода и водоснабжение населенных мест. Зоны санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов питьевого назначения». Зарегистрировано в Минюсте РФ 24.04.2002. № 3399. – М., 2002. – 12 с.
- Орадовская А.Е., Лапшин Н.Н. Санитарная охрана водозаборов подземных вод. М.: Недра, 1987. 167 с.
- Рекомендации по гидрогеологическим расчетам для определения границ второго и третьего поясов санитарной охраны подземных источников хозяйственно-питьевого водоснабжения. – М.: ВНИИВОДГЕО, 1983. – 200 с.
- Нахапетян А.К. О гидрогеологическом обосновании защищенности подземных вод применительно к расчетам зон санитарной охраны водозаборов подземных вод // Разведка и охрана недр. – 2014. – № 5. – С. 39–40.
- Обустройство зон санитарной охраны источников питьевого водоснабжения. Аналитический материал Российской ассоци-

сов в зонах «у источника» характеризуется скоростью 10,8 мкг C/  $\rm дm^3$ сутки.

Проведенный комплекс исследований позволяет сделать вывод о том, что породы четвертичных отложений, выполняющих Сусунайскую депрессию, обладают высоким «очищающим» потенциалом по отношению к рассматриваемым типам загрязнения. Эта способность определяется двумя основными факторами:

- высокой обменной емкостью глинистой составляющей пород, обусловленной присутствием хлорит-монтмориллонитовых и гидрослюдисто-монтмориллонитовых глинистых минералов, а также органических включений;
- 2) формированием в водоносном комплексе восстановительных условий, являющихся следствием значительной органогенности пород и обеспечивающих жизнедеятельность таких микроорганизмов, как денитрифицирующих, сульфатредуцирующих и водородпродуцирующих. В результате окислительно-восстановительных процессов и тесно связанных с ними микробиологических процессов в водоносных горизонтах существует потенциальная возможность разрушения органоминеральных комплексов загрязняющих веществ, восстановления кислородсодержащих компонентов (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), а также осаждения различных минеральных образований металлов.

Таким образом, опыт более чем 40-летней эксплуатации водозаборов подземных вод, расположенных на территории г. Южно-Сахалинска, и результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о том, распространение полютантов из поверхностных источников загрязнения блокируется гидроминеральным комплексом в непосредственной близости от самих источников, что гарантирует безопасную эксплуатацию водозаборов подземных вод, расположенных даже в самой неблагоприятной санитарной обстановке. Границы ЗСО второго и третьего поясов в условиях Сусунайского артезианского бассейна рекомендуется устанавливать в пределах границы ЗСО первого пояса [19, 20].

ации водоснабжения и водоотведения // ВодаMagazine. – 2011. – № 7. – С. 30–33.

- К вопросу оптимизации санитарно-эпидемиологической экспертизы проектов зон санитарной охраны источников питьевого назначения / С.И. Плитман, Л.Е. Беспалько, И.Т. Ибрагимова, В.Н. Кошенков // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2009. – № 3. – С. 13–14.
- Соколина М.Ю. Проблемы соблюдения зон санитарной охраны в черте города при строительстве водозаборных узлов // Разведка и охрана недр. – 2014. № 2. – С. 54–56.
- Малинина Е.М., Корноухова И.Е. Зоны санитарной охраны подземных водозаборов // Вологдинские чтения. – 2009. – № 76. – С. 97–99.
- Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода-порода. В 5 т. Т. 1: Система вода-порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование / В. А. Алексеев и др. / отв. ред. тома С.Л. Шварцев. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 244 с.

- Сахаров В.А., Мелкий В.А., Никонова Е.В. Оценка степени опасности возникновения неблагоприятной санитарно-эпидемиологической ситуации в водоносных горизонтах территории // Безопасность жизнедеятельности. – 2008. – № 5 (89). – С. 61–64.
- 11. Сахаров В.А. Зонирование урбанизированных территорий по геоэкологическому состоянию грунтовых вод: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск, 2010. 22 с.
- Гигиенические нормативы ГН 2.1.5.1315-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования». Зарегистрировано в Минюсте РФ 19.05.2003. № 4550. – М., 2003. – 94 с.
- Челидзе Ю.Б., Фараонова И.И. Техногенное загрязнение подземных вод России, используемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения // Разведка и охрана недр. – 2013. – № 3. – С. 24–28.
- Вдовина О.К., Малинина Е.Н., Попова А.Н. Экологическая роль геохимического фона // Разведка и охрана недр. – 2012. – № 7. – С. 61–63.
- 15. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы Сан-ПиН 2.1.4.1074-01. «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого во-

доснабжения. Контроль качества». Зарегистрировано в Минюсте РФ 31.10.2001. № 3011. – М., 2002. – 14 с.

- Литвиненко З.Н. Влияние органических веществ на развитие микробных комплексов в подземных водах // Матер. конф. XVI краевого конкурса молодых ученых и аспирантов. – Хабаровск, 2014. – С. 238–242.
- Кулаков В.В., Кондратьева Л.М. Биогеохимические аспекты очистки подземных вод Приамурья // Тихоокеанская геология. – 2008. – Т. 27. – № 1. – С. 109–118.
- Кирюхин В.А., Норова Л.П. Гидрогеохимия городских агломераций // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. № 1. С. 201–205.
- Казаченко А.С. Нормативно-правовое и информационное обеспечение градостроительной деятельности в поселениях: Инженерно-экологические системы: матер. науч.-практ. конф. – СПб.: СПбГАСУ, 2012. – С. 200–204.
- Ширина Н.В., Кононова О.Ю. Актуальность проблемы учета зон с особыми условиями использования территории // Вестник Белгородского государственного технологического университета. – 2014. – № 2. – С. 135–138.

Поступила 25.09.2015 г.

#### UDC 571:556.388.2

# JUSTIFICATION OF THE BOUNDARIES OF THE SANITARY PROTECTION ZONES OF GROUNDWATER INTAKES IN URBAN AREAS BY THE EXAMPLE OF YUZHNO-SAKHALINSK

# Valery A. Sakharov,

Sakhalin State University, 290, Lenin street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia. E-mail: sakhsakh@yandex.ru

## Olga A. Morozova,

Sakhalin State University, 290, Lenin street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia. E-mail: sgi84@mail.ru

Yulia A. Zhukova, Sakhalin State University, 290, Lenin street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia. E-mail: yulia.zhukowa@mail.ru

**The relevance of the work** is caused by the need to establish special land use conditions within the zones of sanitary protection and third zones according to the existing standard regulations. At the same time, natural hydromineral complex, in certain conditions, has the ability to delay and decompose pollutants, allowing the pollutants to migrate over significant distances. After necessary research, the size of the sanitary protection zones can be reduced to the minimum necessary without compromising safety of operation of water intakes. This is highly relevant to human settlements on the territories with are groundwater intakes.

**The aim** of the research is to determine the true dimensions of the boundaries of sanitary protection zones of groundwater intakes considering the capacity of hydromineral complex to prevent the migration of contaminants from surface sources of pollution in aquifers and complexes.

**Methods:** laboratory determination of mineralogical composition, total content of organic substances and protein, determination of absorption capacity and composition of the exchange complex, composition of pore solutions and readily soluble salts, total content of phosphorus and arsenic in the rocks of aeration zone and water-bearing rocks and chemical composition of groundwater, including trace components. Laboratory studies of direction and intensity of microbiological processes.

**Results.** The authors made a conclusion on freezing by geological medium the pollutant distribution from surface sources in the immediate vicinity of the sources; defined the capabilities of natural microbiat populations in degradation of organic pollutants. It is recommended to determine on-site the Susunaiski artesian basin the boundaries of sanitary protection zones of the second and the third belts within the boundary of sanitary protection zone of the first belt.

#### Key words:

Sanitary protection zone, source of pollution, hydro-mineral complex, autotrophic process, heterotrophic process, microbiological barrier, exchange capacity of rocks.

#### REFERENCES

- Sanitarnye pravila i normativy SanPiN 2.1.4.1110-02 «Pitevaya voda i vodosnabzhenie naselennykh mest. Zony sanitarnoy okhrany istochnikov vodosnabzheniya i vodoprovodov pitevogo naznacheniya». Postanovlenie glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha ot 14.03.2002 № 10 [Sanitary rules and norms SAn-Pin 2.1.4.1110-02 Drinking water and water supply of settlements. Sanitary protection zones of water supply sources and drinking water pipelines]. 12 p.
- Oradovskaya A.E., Lapshin N.N. Sanitarnaya okhrana vodozaborov podzemnykh vod [Sanitary protection of underground water intake areas]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 167 p.
- Rekomendatsii po gidrogeologicheskim raschetam dlya opredeleniya granits vtorogo i tretego poyasov sanitarnoy okhrany podzemnykh istochnikov khozyaystvenno-pitevogo vodosnabzheniya [Recommendations in hydrogeological calculations to determine the boundaries of the second and third sanitary protection belts of utility and drinking water supply]. Moscow, VNIIVODGEO Publ., 1983. 200 p.
- Nakhapetyan A.K. O gidrogeologicheskom obosnovanii zashchishchennosti podzemnykh vod primenitelno k raschetam zon sanitarnoy okhrany vodozaborov podzemnykh vod [Hydrogeological justification of groundwater protection in respect to calculations of sanitary protection of underground water intakes]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2014, no. 5, pp. 39–40.
- Obustroystvo zon sanitarnoy okhrany istochnikov pitevogo vodosnabzheniya. Analiticheskiy material Rossiyskoy assotsiatsii vodosnabzheniya i vodootvedeniya [Arrangement of sanitary protection areas of drinking water supply sources. Analytical material of Russian water and sanitation association]. *VodaMagazine*, 2011, no. 7, pp. 30–33.
- Plitman S.I., Bespalko L.E., Ibragimova I.T., Koshenkov V.N. K voprosu optimizatsii sanitarno-epidemiologicheskoy ekspertizy proektov zon sanitarnoy okhrany istochnikov pitevogo naznacheniya [Optimization of sanitary-epidemiological expertise of the projects of sanitary protection areas of drinking water sources]. Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie, 2009, no. 3, pp. 13–14.
- Sokolina M.Yu. Problemy soblyudeniya zon sanitarnoy okhrany v cherte goroda pri stroitelstve vodozabornykh uzlov [Problems in compliance with sanitary protection areas within the city when constructing water supply facilities]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2014, no. 2, pp. 54–56.
- Malinina E.M., Kornoukhova I.E. Zony sanitarnoy okhrany podzemnykh vodozaborov [Sanitary protection areas of underground water intakes]. Vologdinskie chteniya, 2009, no. 76, pp. 97–99.
- Alekseev V.A. Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda-poroda. T. 1: Sistema voda-poroda v zemnoy kore: vzaimodeystvie, kinetika, ravnovesie, modelirovanie [Geological evolution and self-organization of the system water-rock. V. 1. Water-rock system in earth crust: interaction, kinetics, balance, modeling]. Ed. by S.L. Shvartsev. Novosibirsk, SO RAN press, 2005. 244 p.
- Sakharov V.A., Melkiy V.A., Nikonova E.V. Otsenka stepeni opasnosti vozniknoveniya neblagopriyatnoy sanitarno-epidemiologicheskoy situatsii v vodonosnykh gorizontakh territorii [Estimation of hazard level of occurrence of high burden of sanitaryepidemiological situation in water-bearing strata on the territory]. Bezopasnost zhiznedeyatelnosti, 2008, no. 5 (89), pp. 61–64.

- Sakharov V.A. Zonirovanie urbanizirovannykh territoriy po geoekologicheskomu sostoyaniyu gruntovykh vod. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Zoning of urban lands by geological state of ground waters. Cand. Diss.]. Tomsk, 2010. 22 p.
- Gigienicheskie normativy GN 2.1.5.1315-03 «Predelno dopustimye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v vode vodnykh obektov khozyaystvenno-pitevogo i kulturno-bytovogo vodopolzovaniya». Zaregistrirovano v Minyuste RF 19.05.2003. № 4550 [Hygenic normatives GN 2.1.5.1315-03. Maximum permissible concentrations of chemicalsin water and water objects of utility drinking and cultural-general water supply]. Moscow, 2003. 94 p.
- Chelidze Yu.B., Faraonova I.I. Tekhnogennoe zagryaznenie podzemnykh vod Rossii, ispolzuemykh dlya khozyaystvenno-pitevogo vodosnabzheniya [Technogenic pollution of underground waters in Russia, which are used for utility and drinking water system]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2013, no. 3, pp. 24–28.
- Vdovina O.K., Malinina E.N., Popova A.N. Ekologicheskaya rol geokhimicheskogo fona [Ecological role of geochemical background]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2012, no. 7, pp. 61–63.
- 15. Sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normativy SanPiN 2.1.4.1074-01. «Pitevaya voda. Gigienicheskie trebovaniya k kachestvu vody tsentralizovannykh sistem pitevogo vodosnabzheniya. Kontrol kachestva». Zaregistrirovano v Minyuste RF 31.10.2001. № 3011 [Sanitary rules and norms SAnPin 2.1.4.1074-01 Drinking water. Hygienic requirements to water quality in central systems of drinking water supply. Water quality]. Moscow, 2002. 14 p.
- 16. Litvinenko Z.N. Vliyanie organicheskikh veshchestv na razvitie mikrobnykh kompleksov v podzemnykh vodakh [Influence of organic substances on development microbic complexes in underground waters]. Materialy konferentsii XVI kraevogo konkursa molodykh uchenykh i aspirantov [Materials of the conference of the XVI regional competition for young scientists and postgraduates students]. Khabarovsk, 2014. pp. 238-242.
- Kulakov V.V., Kondrateva L.M. Biogeokhimicheskie aspekty ochistki podzemnykh vod Priamurya [Biogeochemical aspects of estimating underground waters of Amur river region]. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2008, vol. 27, no. 1, pp. 109–118.
- Kiryukhin V.A., Norova L.P. Gidrogeokhimiya gorodskikh aglomeratsiy [Hydrogeochemistry of city regions]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 201–205.
- Kazachenko A.S. Normativno-pravovoe i informatsionnoe obespechenie gradostroitelnoy deyatelnosti v poseleniyakh [Regulatory and information support of urban development in settlements]. *Inzhenerno-ekologicheskie sistemy: Materialy nauchnoprakticheskoy konferentsii* [Proc. scientific-practical conference. Engineering and ecological systems.]. St-Petersburg, SPbGASU Press, 2012. pp. 200-204.
- 20. Shirina N.V., Kononova O.Yu. Aktualnost problemy ucheta zon s osobymi usloviyami ispolzovaniya territorii [Relevance of the problem of considering zones with special conditions of using territories]. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta, 2014, no. 2, pp. 135–138.

Received: 25 September 2015.

#### УДК 553.2.065

# ТЕОРИИ, ГИПОТЕЗЫ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО ПОРОДО-РУДООБРАЗОВАНИЯ И РЕАЛЬНОСТЬ: ФАКТЫ И АРГУМЕНТЫ

# Кучеренко Игорь Васильевич,

д-р геол.-минерал. наук, профессор каф. геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: kucherenko.o@sibmail.com

**Актуальность исследования** определяется необходимостью уточнения теорий, оценки гипотез гидротермального породо-, рудообразования, в которые не вписываются некоторые наблюдаемые в природе факты.

**Цель работы:** доказать на основе известных и новых эмпирических данных положения, исключающие и/или дополняющие следующие из теорий и гипотез выводы.

Методы исследований: изучение гомогенизации газово-жидких включений в гидротермальных минералах, диагностика минералов и реконструкция последовательности образования минеральных комплексов и минералов в их составе, петролого-геохимические исследования околорудных (рудовмещающих) метасоматических ореолов (колонок) и внутридайковых аподолеритовых метасоматитов, образованных в кристаллическом и черносланцевом субстрате в гидротермальных месторождениях золота, изучение пространственно-временных и причинно-следственных соотношений метасоматических горных пород и рудноминеральных комплексов с производными регионального метаморфизма и магматизма в золотоносных районах, сравнительный анализ метасоматического породо- и рудообразования в кристаллическом субстрате и толщах черных сланцев.

**Результаты.** В совершенствовании теории метасоматических процессов необходимо как реальные природные явления учитывать: 1) пульсационный режим функционирования трещинно-поровых породно-флюидных систем, то есть порционное, с перерывами, поступление гидротермальных, в том числе металлоносных рудообразующих, растворов в области породо-рудообразования; 2) застойный режим не только, согласно теории, поровых, но и трещинных флюидов в единых гидравлически связанных трещинно-поровых породо-рудообразования; 3) встречную, из трещиннох трещинно-поровых породых, по и трещинных флюидов в единых гидравлически связанных трещинно-поровых породых, в том исстемах метасоматического породо-рудообразования; 3) встречную, из трещинных растворов в поровые, а не только в обратном направлении, диффузию компонентов, усложняющую обусловленную диференциальной подвижностью компонентов минеральный, согласно теории, состав их тыловой (осевой) зоны; 4) подвижи, как спедствие, полиминеральный, а не мономинеральный, согласно теории, состав их тыловой (осевой) зоны; 4) подвижность (миграционную способность) считающихся в теории инертными при всех условиях Р, Ті, Аl и накопление контрастных аномалий ассоциации фемофильных элементов К, Р, Ті, Мд, Fe, Ca, Mn в тыловых зонах околорудных (рудовмещающих) метасоматических ореолов (колонок) в ближнем (до 1,0...1,5 км) обрамлении рудоконтролирующих и раствороподводящих глубинных разломов.

В метаморфогенно-гидротермальную гипотезу образования месторождений золота в толщах черных сланцев не вписываются следующие факты: 1) принадлежность гидротермально измененных в месторождениях пород не к производным регионального метаморфизма гидратации фации зеленых сланцев, как это следует из гипотезы, а к свойственному и в кристаллическом субстрате сочетанию пропилитовой и березитовой метасоматических формаций; 2) субкларковый уровень дорудных содержаний золота в черных сланцах, вмещающих уникальное (Сухой Лог) и крупные (Вернинское, Чертово Корыто и др.) месторождения; 3) геолого-вещественно-генетическая однородность образованных в толщах черных сланцев месторождений с магматогенными месторождениями, залегающими в кристаллическом субстрате.

Приведены результаты исследований, доказывающие, в отличие от гранитогенной гипотезы, образование месторождений золота в черносланцевом и кристаллическом субстрате в составе антидромных специализированных на золото флюидно-рудномагматических гранит-диорит-долеритовых комплексов на позднем умеренно щелочном базальтоидном этапе их становления.

#### Ключевые слова:

Теория эндогенных метасоматических процессов, гранитогенная, базальтогенная, метаморфогенная, полигенная гипотезы образования месторождений золота, факты, аргументы, доказательства.

#### Постановка задачи

Поиски истины, то есть корректных решений научных, в том числе дискуссионных, проблем сопровождаются открытием, накоплением новых данных, которые подтверждают ранее принятые представления или в них не укладываются и служат основанием для их уточнения или пересмотра. Критерием оценки достоверности научных выводов, как известно, служат эмпирические и/или экспериментальные данные при непременном условии многократной их повторяемости. Повторяемость устраняет фактор случайности в оценке достоверности не только научных положений, но и самих фактов, особенно тех, которые вступают в противоречие с теорией (гипотезой) в тех или иных ее аспектах. Как правило, между открытием новых фактов, многократным подтверждением их достоверности и включением в доказательную базу научных выводов проходит значительное время. Это объясняет, более того, – оправдывает известный консерватизм в науке.

Современные теории и гипотезы гидротермального породо- и рудообразования не составляют исключения из общего правила. Нередко проходят многие десятилетия, прежде чем когда-то открытые в этой области знаний новые факты получают статус достоверных и стимулируют переход количества в качество, то есть убеждают противников уточнения или пересмотра устоявшихся научных положений в необходимости внести в них поправки или отказаться от них и формулировать новые.

Гидротермальные месторождения с их породами, рудами, условиями залегания, последовательностью образования и другими любезно оставленными природой человеку следами служат единственным источником эмпирической информации, без знания которой невозможно понять, как действовала природа, создавая месторождения. Об этом нельзя узнать в кабинетах и лабораториях, даже используя метод дедуктивного мышления. Об этом можно узнать посредством детального изучения устройства месторождений, что есть обязательное условие познания сущности процессов рудообразования. Именно совокупность эмпирических данных формирует питательную среду, в которой вызревают идеи, гипотезы, теоретическая, экспериментальная проверка которых на основе законов химии, физики, смежных наук стимулирует и обеспечивает их трансформацию в теорию или отказ от них как от несостоятельных. Этих очевидных условий прогресса в обсуждаемой области знаний придерживаются не все – дефицит эмпирических, нередко «лежащих на поверхности», но многими не замечаемых, фактов – причина банальной неосведомленности (человеческого фактора) плодит многовариантные решения, гипотезы и видна невооруженным глазом во множестве публикаций. Примеры такого рода приведены ниже.

Существуют известные обусловленные и объективными обстоятельствами - спецификой гидротермальных рудообразующих систем - трудности в поисках новых фактов, способных обеспечить формирование и совершенствование теории гидротермального рудообразования в генетическом и металлогеническом ее аспектах. Специфика заключается в невозможности непосредственного наблюдения за ходом функционировавших в прошлые геологические эпохи процессов рудообразования с замерами их параметров, воспроизведения фактора геологического времени в экспериментах, в пространственной разобщенности и ограниченной доступности для изучения составляющих рудообразующих систем - глубинных источников энергии, металлоносных флюидов (растворов и рудного вещества), путей подъема флюидов на верхние горизонты земной коры, а нередко и производных рудообразования - месторождений полезных ископаемых. Вследствие этого недостающие для создания полноценной теории сведения накапливаются чрезвычайно медленно и иногда вынужденно заменяются предположениями, которые впоследствии подтверждаются фактами или отвергаются. Тем не менее, в XX столетии основы теории гидротермального рудообразования в генетическом ее аспекте созданы посредством реконструкции процессов по оставленным последними вещественным следам и при том, что некоторые ее положения, в том числе и прежде всего металлогенического содержания, остаются дискуссионными и требуют более содержательных доказательств.

Приведенные общие замечания представляются справедливыми в приложении к процессам образования гидротермальных месторождений всех видов полезных ископаемых. Однако наряду с общими законами гидротермального рудообразования существуют особенности процессов, определяющие составы, термодинамические, физико-химические режимы, последовательности образования околорудных метасоматических колонок и рудно-минеральных комплексов в них, способные раскрыть обусловленность рудообразования более масштабными геологическими явлениями, скажем, геодинамическими режимами и магматизмом конкретного петрохимического профиля, продуцирующим оруденение одного или нескольких видов. Поэтому и вследствие распространенных явлений конвергенции эндогенного рудообразования в целом и гидротермального в частности обнаруженные в месторождениях одного вида полезного ископаемого новые достоверные (повторяющиеся) факты, требующие корректировки теории или отказа от тех или иных ее положений, следует оценивать на предмет возможности их использования для уточнения теории образования месторождений других видов.

В статье систематизированы и обсуждаются рассредоточенные в публикациях автора последних десятилетий и неопубликованные факты, обнаруженные в мезотермальных месторождениях золота южного горно-складчатого обрамления Сибирской платформы, которые образуют согласованный ансамбль, но не укладываются в системы доказательств некоторых положений современной теории гидротермальной метасоматической зональности Д.С. Коржинского [1], концепции потенциальной рудоносности гранитоидов Л.В. Таусона [2], трех наиболее популярных из четырех известных металлогенических гипотез образования гидротермальных месторождений золота - гранитогенной, метаморфогенной, полигенной. В доказательных базах этих гипотез упомянутые факты не находят объяснения. Напротив, они в совокупности усиливают с уточнениями систему доказательств наименее популярной среди специалистов базальтогенной гипотезы и, как представляется, ускоряют процедуру трансформации ее металлогенической составляющей в теорию, и включение последней в сочетании с генетической составляющей в общую теорию гидротермального рудообразования.

Поскольку начиная с шестидесятых годов прошлого столетия практикуется противопоставление, дифференциация гидротермальных месторождений золота на две совокупности – образованных в кристаллических породах магматогенных и в толщах углеродистых сланцев метаморфогенных [3], детально изучались месторождения той и другой совокупности. Это обеспечило полноту сравнительного анализа информации, в результате которого показана несостоятельность подобного противопоставления.

Ниже обсуждаются следующие проблемные вопросы и темы.

- Режим функционирования гидротермальных рудообразующих систем – эволюционный или пульсационный?
- Субфации зеленосланцевой фации регионального метаморфизма гидратации или минералого-петрохимические зоны метасоматических ореолов пропилитовой-березитовой формаций образованы в околорудном пространстве черных сланцев?
- Кремний как индикатор кислотного и щелочного режимов в системе «порода металлоносный раствор».
- Мономинеральный кварцевый, двухминеральный кварц-серицитовый составы соответственно осевой и тыловой зон или полиминеральный состав обеих зон формируются в околорудных метасоматических ореолах (колонках) в мезотермальных месторождениях золота?
- Инертны при всех или подвижны при определенных условиях Ті, Р, Аl в гидротермальных рудообразующих системах?
- Породный источник золота, сосредоточенного в рудах месторождений, образованных в толщах черных сланцев, реальность или миф?
- Гидротермальное рудообразование следствие потенциальной рудоносности или металлогенической специализации гранитоидов (магматических комплексов)?

#### Объекты и методики исследования

Для обеспечения заявленного сравнительного анализа исследования выполнены в промышленных месторождениях золота, в каждом из которых золоторудные кварцевые жилы и/или минерализованные зоны (залежи) жильно-прожилкововкрапленных руд образованы в кристаллических породах или в толщах углеродистых (черных) сланцев, или в том и другом субстрате.

- Крутопадающая рудная залежь позднепалеозойского месторождения Когадыр локализована в обрамлении Кызыл-Кайнарской надвиговой структуры (глубинного разлома) Южного Казахстана среди позднепалеозойских монцонитоидов.
- Минерализованные зоны позднепалеозойского месторождения Восточного в Южном Прибалхашье залегают в среднепалеозойской толще терригенно-карбонатных пород.
- Кварцевые жилы раннепалеозойских Центрального и Берикульского месторождений контролируются оперяющими структурами Кузнецко-Алатаусской зоны глубинных разломов и залегают соответственно в массиве гранитоидов раннепалеозойского мартайгинского комплекса и в среднекембрийской толще покровных базальтоидов берикульской свиты.
- Субвертикальные рудные залежи среднепалеозойского месторождения Зун-Холба и кварцевые жилы одновозрастного с ним месторождения Зун-Оспа контролируются Урик-Китойской зоной глубинных разломов (Восточный

Саян) и залегают соответственно среди карбонатно-терригенных пород позднерифейской ильчирской свиты и в Амбартогольском массиве среднепалеозойских гранитоидов холбинского комплекса.

- Кварцевые жилы позднепалеозойских Западного и Ирокиндинского месторождений в Северном Забайкалье контролируются Келянской зоной глубинных разломов и образованы соответственно в габрро-гранитном массиве позднерифейского муйского комплекса и среди архейских ультраметаморфических пород Муйского выступа фундамента.
- Кварцевые жилы позднепалеозойского Кедровского месторождения в Северном Забайкалье залегают в Тулдуньской зоне глубинных разломов среди углеродистых сланцев позднерифейской кедровской свиты и в позднепалеозойской Кедровской зрелой очагово-купольной структуре ультраметаморфитов и гранодиоритов ядра.
- Кварцевые жилы и минерализованные зоны позднепалеозойских Каралонского и Уряхского месторождений Северного Забайкалья образованы в Сюльбанской зоне глубинных разломов в позднерифейских толщах покровных вулканитов и углеродистых сланцев соответственно келянской и водораздельной свит, в гранитоидах вендского падоринского и позднепалеозойского конкудеро-мамаканского комплексов.
- Кварцевые жилы позднепалеозойского Верхне-Сакуканского месторождения залегают в массиве гранитоидов раннепротерозойского кодарского комплекса в Северном Забайкалье на югозападной окраине архейского Чарского ультраметаморфического выступа фундамента.
- Рудные залежи позднепалеозойских месторождений Ленского района Сухой Лог, Вернинского, Невского, Медвежьего залегают в обрамлении Кадали-Сухоложского глубинного разлома в позднерифейских толщах углеродистых сланцев хомолхинской, имняхской, аунакитской, вачской свит.
- Пологая залежь среднепалеозойского месторождения Чертово Корыто в Патомском нагорье образована в висячем боку глубинного разлома среди углеродистых сланцев раннепротерозойской михайловской свиты.

Перечисленные месторождения вскрыты рельефом, скважинами колонкового бурения, поверхностными, подземными горными выработками в разных сочетаниях и доступны для изучения в диапазоне глубин от поверхности до многих сотен (в пределе до 800) метров. Детальное геологическое картирование по профилям на наиболее информативных обнаженных участках поверхности, документация выработок, заключались в изучении стратификации осадочных толщ, складчатых и разрывных структур, ареалов регионального и локального очагово-купольного метаморфизма, ореолов околорудного (рудовмещающего) метасоматизма, морфологии, условий залегания, составов всех видов магматических пород и руд, последовательности их образования на основе структурных пересечений в сочетании с признаками термического воздействия поздних образований на ранние (разгерметизации вакуолей в кварце в экзоконтактах даек, гидротермальных околорудных изменений пород).

Диагностика минерального, химического составов и видовой принадлежности осадочных, метаморфических, магматических, метасоматических пород осуществлялась на основе полных химических («мокрых») силикатных анализов в сочетании с диагностикой слагающих горные породы и руды минералов в оптическом диапазоне длин волн, в электронных микроскопах с рентгеноспектральным сопровождением в лицензированных лабораториях. Содержания в породах и минералах металлов определялись по методу атомной абсорбции с чувствительностью 1.10<sup>-8</sup> % (золото, серебро), 5.10<sup>-7</sup> % (ртуть). Оценка термодинамических режимов функционирования, составов металлоносных флюидов выполнялась посредством изучения газово-жидких включений в кварцах всех рудно-минеральных комплексов. Результаты изотопных исследований использованы в оценке возраста месторождений, источников серы сульфидов, углерода керогена и метасоматических карбонатов в метасоматитах и рудах. Разносторонние исследования углерода керогена, участвующего в составе черных сланцев, обеспечили реконструкцию условий образования и изменений его в процессах рудообразования. Аналитические данные обрабатывались методами математической статистики, посредством петрохимических пересчетов и балансовых расчетов миграции петрогенных и рудогенных элементов при метасоматизме и рудообразовании.

#### Результаты и обсуждение

Режим функционирования гидротермальных рудообразующих систем – эволюционный или пульсационный?

Предложенные в первой половине двадцатого столетия Д.С. Коржинским эволюционная [4] и С.С. Смирновым пульсационная [5] концепции функционирования магматогенных гидротермальных систем породо- и рудообразования мирно сосуществуют и в настоящее время. Попытки их объединить в шестидесятых годах [6] не нашли поддержки.

Согласно эволюционной концепции, непрерывное истечение надкритических флюидов из очагов их генерации – гранитных расплавов – сопровождается дифференциацией растворенных в них кислотных и щелочных компонентов, обусловленной б?льшей скоростью миграции первых в процессе фильтрации флюидов в апикальных частях гранитных массивов и в надинтрузивном пространстве. Вследствие опережающего ухода кислотных компонентов вверх – явления, названного Д.С. Коржинским опережающей волной кислотных компонентов, отстающие флюиды приобретают щелочную реакцию и, взаимодействуя с гранитами и/или породами рамы, формируют щелочные (основные) метасоматиты, содержащие щелочные полевые шпаты (альбит, ортоклаз, микроклин), биотит (флогопит), амфиболы в разных сочетаниях и количественных соотношениях. Взаимодействие с породами кислотных флюидов, активность кислотных компонентов в которых при дефиците щелочей (оснований) вследствие фиксации их в минералах и по мере охлаждения флюидов возрастает на фронте движущегося потока, сопровождается растворением оснований и образованием кислотных метасоматитов - грейзенов, березитов, аргиллизитов - в зависимости от температурных режимов флюидов. Насыщение последних в процессе «кислотного выщелачивания» пород компонентами оснований, в свою очередь, сопровождается инверсией кислотного режима продолжающих фильтроваться вверх флюидов в щелочной с последующей фиксацией оснований в образующейся твердой фазе. В итоге завершающие процесс «отработанные» флюиды приобретают реакцию, близкую к нейтральной. По классификации Д.С. Коржинского периоды функционирования растворов с соответствующим режимом представляют раннюю щелочную, кислотного выщелачивания, позднюю щелочную, нейтральных растворов стадии эволюционного гидротермального процесса породо- и рудообразования.

Таким образом, согласно теории, в результате породно-флюидных взаимодействий над генерирующим флюиды магматическим очагом формируется зональная колонна метасоматических пород, по номенклатуре Петрографического кодекса [7] – метасоматический комплекс в составе пространственно разобщенных сменяющих один другой снизу вверх подкомплексов (колонок) ранних щелочных, кислотных, поздних щелочных метасоматитов.

Однако в гидротермальных месторождениях металлов, в частности золота, залегающих, например, в массивах гранитоидов, как правило, если не всегда, производные всех перечисленных стадий частично или полностью пространственно совмещены. Грейзены, березиты, аргиллизиты нередко образованы среди пород, подвергшихся метасоматизму ранней щелочной стадии – альбитизации, калишпатизации, биотитизации, амфиболизации. В свою очередь, перечисленные метасоматиты либо вмещают жильно-прожилково-вкрапленную рудную минерализацию, либо обрамляют рудоносные кварцевые жилы, содержащие разнообразные и многочисленные минералы-основания – производные поздней щелочной стадии.

С позиции эволюционной концепции и представления об опережающей волне кислотных компонентов эти факты можно было бы объяснить, предположив, что генерирующий металлоносные флюиды очаг остаточных насыщенных летучими расплавов «мигрирует» в нижние части магматической камеры по мере опережающей кристаллизации расплавов в ее верхних частях, исходя, в свою очередь, из предположения о снижении скорости охлаждения расплавов - непременного условия их кристаллизации - с возрастанием глубины. В таком случае инверсия раннего щелочного режима в кислотный поднимающихся флюидов, проходящих больший путь по твердым уже породам верхних частей магматической камеры, оставляющих щелочи в образующихся минералах на больших глубинах в массивах гранитоидов, может происходить также на больших глубинах, вследствие чего «кислотное выщелачивание» сменит щелочной режим уже в породах, ранее подвергшихся щелочному метасоматизму при «высоком стоянии» генерирующего флюиды очага остаточных расплавов. Но наблюдаемое в месторождениях совместное залегание оснований, в том числе рудных минералов, карбонатов, - производных поздней щелочной стадии среди кислотных метасоматитов, возможно при условии прекращения фильтрации флюидов, то есть в застойном гидродинамическом режиме. Последнее, однако, теорией не предусмотрено.

Менее гипотетичны объяснения наблюдаемых в гидротермальных месторождениях пространственно-временных соотношений щелочных (основных) и кислотных метасоматитов с использованием давно известных фактов, в совокупности доказывающих пульсационный (порционный) механизм поступления из очагов генерации в образующиеся месторождения металлоносных флюидов. Модель такого механизма демонстрирует природа в областях современной вулканической деятельности - извержения силикатных расплавов чередуются с выделением в атмосферу вулканических газов – водных надкритических металлоносных флюидов, несущих соединения металлов [8], аналогичные слагающим руды гидротермальных месторождений, образованных в прошлые геологические эпохи. Периодическое прекращение вулканической (магматической и флюидной) активности на длительное время сменяется ее возобновлением. Трудно ожидать адекватное эволюционной концепции и представлению об опережающей волне кислотных компонентов следующее из них выдержанное зональное строение метасоматической колонны (комплекса) при многократном внедрении металлоносных флюидов в условиях высокой сопровождающей гидротермальные процессы тектонической активности земной коры и мантии, обеспечивающей обновление и изменение путей миграции флюидов. Напротив, пространственное совмещение кислотных и основных метасоматитов с позиции пульсационной концепции представляется вполне естественным.

Как было отмечено А.Г. Бетехтиным в середине прошлого столетия [9], в каждом из последовательно образованных рудно-минеральных комплексов месторождений повторяется очередность отложения минеральных ассоциаций – в раннем кварце образованы сульфиды и поздние карбонаты, как правило, в стандартных и индивидуальных для каждого вида полезных ископаемых наборах минералов и их разновидностей с участием промышленных минералов – носителей профильных металлов. От раннего к позднему минеральному комплексу уменьшается масса кварца, масса сульфидов достигает максимума в промежуточных по времени образования комплексах, но снижается к заключительному, а масса карбонатов возрастает в заключительном комплексе. Исключения, как им и положено, редки и всего лишь усложняют генерализованную схему. Таким образом, последовательность отложения минералов трех классов – оксидов, сульфидов, карбонатов – с упорядоченным изменением их массы повторяется в объемах каждого рудно-минерального комплекса и в суммарном объеме всех комплексов - в раннем кварца много, сульфидов, карбонатов мало; в промежуточных комплексах кварца, карбонатов умеренно, сульфидов много; в позднем комплексе кварца, сульфидов мало, карбонатов много.

Приведенная схема последовательности минералообразования, по мнению И.Н. Кигая [6], характеризует гидротермальный процесс как «непрерывно-прерывистый».

Прерывистая составляющая процесса обусловлена повторяемостью эволюции кислотно-основных свойств флюида в возрастном диапазоне образования каждого рудно-минерального комплекса как отражением порционного поступления его в область рудообразования. Реконструкция кислотно-основных режимов флюида при участии в составе каждого рудно-минерального комплекса чуткого их индикатора - кремнезема - обеспечивается «поведением» последнего. Эволюция происходит по сценарию, напоминающему описанный выше. Поступивший в разломы, трещины флюид образует единую гидравлически связанную систему с поровым раствором вмещающих пород, взаимодействуя с последними, растворяет кварц, щелочной режим сменяется кислотным, в связи с чем растворенный кремнезем, диффундирующий в трещинный раствор, переходит в твердую фазу кварц, образующий прожилки и жилы. В процессе и в результате «кислотного выщелачивания» флюид насыщается основаниями, снова приобретает щелочную реакцию, которая обеспечивает отложение в кварце сульфидов и карбонатов.

Признаками условной «непрерывности» гидротермального процесса, в свою очередь, служат причинно-следственные связи всех рудно-минеральных комплексов между собой, выраженные (овеществленные) в упорядоченной смене сходных на уровне классов минеральных ассоциаций и их массы в составе не только каждого комплекса, но и в совокупном составе всех комплексов, обусловленной повторяемостью эволюции кислотно-основных режимов в породно-флюидной системе формирования каждого комплекса и в рамках всего петро-рудно-генетического пульсационного процесса породо-рудообразования.

В результате изучения методами термобарогеохимии вакуолей минералов руд ряда золоторудных месторождений региона, образованных в возрастном диапазоне от раннего палеозоя до позднего мезозоя в разнообразном, в том числе черносланцевом субстрате, реконструированы однообразные сходные термодинамические, физико-химические режимы отложения рудно-минеральных комплексов, эволюция фазового состояния флюидов, составы и концентрации твердых и растворенных в них химических соединений (катионов, анионов) и газов, их изменения от начала до завершения в каждом месторождении процесса рудообразования. Здесь обратим внимание на температурные режимы процессов, однообразно повторяющиеся во всех объектах независимо от времени и среды их образования (рис. 1) [10, 11].



**Рис. 1**. Температурные режимы минералообразования в золоторудных месторождениях [10, 11]

Fig. 1. Temperature conditions of mineral-formation in gold ore deposits [10, 11]

В диапазоне от 500 до 50 °С температуры кристаллизации минералов снижаются от ранних зарождений кварца и, как правило, минимальны при образовании поздних карбонатов в объеме каждого рудно-минерального комплекса, очевидно, по причине естественного постепенного охлаждения флюидов. Последнее способствует возрастанию активности кислотных компонентов в них и инверсии щелочного режима растворов в кислотный, что, в свою очередь, сопровождается массовым отложением кварца в начале образования каждого комплекса. Вместе с тем температура кристаллизации ранних зарождений кварцев каждого рудно-минерального комплекса превышает до ста, иногда более, градусов температуру образования поздних кварцев или карбонатов зарождений предшествующего комплекса. Эта повторяющаяся в каждом месторождении, включая образованные в черносланцевом субстрате, закономерность иногда не выдерживается при отложении минеральных ассоциаций только завершающего комплекса.

Фактором, определяющим более высокую температуру флюида в начале образования каждого рудно-минерального комплекса, может быть только периодическое поступление в область рудообразования его новой порции из очага генерации. Инъекции новой порции флюида всякий раз предшествует дробление ранее образованных минеральных агрегатов и образование новых разломов трещин; последнее обусловливает нередко наблюдаемую пространственную разобщенность смежных комплексов. Состав растворенных в каждой новой порции флюида химических соединений существенно меняется, и это отражается на минеральном составе сменяющих один другой рудноминеральных комплексов, среди которых выделяются продуктивные, определяющие промышленную ценность руд.

Смена низкотемпературного флюида, охлажденного после отложения высокотемпературной ассоциации «обыкновенная роговая обманка – биотит ранней генерации» новой порцией высокотемпературного флюида в процессе образования аподолеритовых метасоматитов внутрирудных даек-флюидопроводников при фильтрации по ним металлоносных флюидов на путях подъема из очагов генерации также происходит и вещественно выражается в кристаллизации высокотемпературного биотита поздней генерации после образования всех ассоциаций относительно низкотемпературных минералов – серицита, хлорита, альбита, карбонатов и других [12].

Доказательством пульсационного режима функционирования гидротермального рудообразующего процесса, то есть порционного поступления в образующиеся месторождения металлоносных флюидов, также служат факты, раскрывающие пространственно-временные соотношения рудно-минеральных комплексов с магматическими породами. Примеры таких соотношений приведены на рис. 3, 4.

Рудообразующие процессы, как это следует из фактов, приведенных на рисунках, функционируют в условиях чередующегося внедрения умеренно щелочных базальтовых расплавов и металлоносных флюидов. Непроверяемый, тем не менее очевидный, вывод заключается в том, что разломы, заполненные базальтовыми расплавами во время их внедрения под давлением, непроницаемы или слабо проницаемы для металлоносных флюидов, но становятся проницаемыми после застывания расплавов и дробления пород в результате всегда сопровождающих магматизм механических деформаций.

Субфации зеленосланцевой фации регионального метаморфизма гидратации или минералого-петрохимические зоны метасоматических ореолов пропилитовой-березитовой формаций образованы в околорудном пространстве черных сланцев?

Проблема существует с семидесятых годов прошлого столетия – времени оформления метаморфогенной гипотезы образования месторождений золота в толщах углеродистых сланцев [3], и одновременного выделения в числе других магматогенной пропилитовой метасоматической формации [13], сопровождающей в сочетании с березитовой гидротермальные месторождения золота в разнообразном кристаллическом субстрате. Производным метаморфогенного и магматогенного гидротермальные ассоциации в составе минералов хлоритовой, эпидотовой групп, карбонатов, кварца, серицита, антигорита, альбита, рутила (лейкоксена), сульфидов и других в разных сочетаниях и количественных соотношениях.

В магматогенных гидротермальных месторождениях ассоциации пропилитов образуют наложенную минерализацию в рудоносных скарнах, периферийные зоны в метасоматических колонках рудоносных грейзенов, золото-уран-полиметаллических березитов, аргиллизитов в золото-серебряных, сурьмяно-ртутных, молибден-урановых месторождениях. В каждом из упомянутых случаев такого рода пространственно-временные соотношения метасоматических формаций рассматриваются как следствие их последовательного или одновременного образования в рамках единого магматогенного гидротермального рудообразующего процесса [13].

В месторождениях золота «черносланцевого типа» вмещающие руды гидротермально измененные черные сланцы, среди которых никто, за редчайшими исключениями [14], не видит березитов, относятся к производным регрессивного метаморфизма фации зеленых сланцев в составе биотитхлоритовой, хлорит-серицитовой, альбит-серицитовой, кварц-карбонатной и других субфаций с наложенными на них более поздними, этапа метаморфогенного и/или магматогенного гидротермального рудообразования, карбонатизацией, окварцеванием, пиритизацией и пр. [15–17].

Чтобы понять, какие геологические процессы обусловливают в толщах черных сланцев минерало- и рудообразование, целесообразно использовать рациональный на данный момент методический прием – выполнить анализ состава, распределения во времени и пространстве минеральных комплексов вмещающих пород и руд в сравнительном аспекте в черносланцевой и несланцевой среде. Такой анализ в обсуждаемых золоторудных месторождениях и районах выполнен, результаты его заключаются в следующем.

На обширных пространствах периферии региональных поясов зрелых ультраметаморфических очагово-купольных сооружений, обрамляющих Бодайбинский и Марокано-Илигирский прогибы в Ленском районе, Центральный антиклинорий в Енисейском районе, Кедровский купол на восточной окраине Муйского выступа фундамента в Северном Забайкалье, толщи черных сланцев позднерифейского возраста подверглись региональному метаморфизму нагревания наиболее низкотемпературной фации с образованием равномерно рассеянного мусковит-биотитового парагенезиса. Ширина этой периферийной зоны ареалов зонального ультраметаморфизма достигает километров...десятков километров, а метаморфический мусковит в сланцах в сравнении с мусковитом околорудно измененных пород отличается чистотой пластинок.

Сменившая мусковит-биотитовый комплекс минерализация в составе хлоритов, минералов эпидотовой группы, кварца, альбита, карбонатов, мусковита-серицита с реликтами лейкоксена, сульфидов, с участием золотосодержащих рудных ассоциаций образована не менее чем на сотни млн л позже [18], контролируется глубинными и оперяющими их разломами – Кадали-Сухоложским, Ишимбинским, Татарским, Тулдуньским – и занимает сравнительно локальные объемы земной коры, следуя в черносланцевых толщах и других породах разномасштабным зонам дробления-рассланцевания и образуя в них залежи и минерализованные зоны жильно-прожилково-вкрапленных сульфидно-карбонатно-кварцевых руд.

В залежах, зонах и их обрамлении ореолы гидротермально измененных черных сланцев, как и околорудно измененных пород в разнообразном кристаллическом субстрате месторождений золота, зональны и включают четыре минералого-петрохимических зоны с повторяющимся во всех средах порядком минералого-петрохимической зональности. Общая мощность ореолов в наиболее проницаемых сланцевых толщах редко превышает 2,0 км, в массивных породах (гранитах, ультраметаморфитах и др.) - десятки метров, хотя «шлейфы» слабых изменений (серицитизации и др.) иногда продолжаются на б?льшие расстояния. Участие в объемах измененных пород рудных тел с геологическими (кварцевые жилы) или определяемыми по данным непрерывного опробования границами, ослабление изменений вплоть до их исчезновения по мере удаления от рудной минерализации доказывает их синрудное (околорудное) происхождение.

Типовая схема (модель) минералого-петрохимической зональности включает фронтальную (мощностью, как правило, до многих сотен м), хлоритовую (эпидотовую) (до десятков м), альбитовую (до первых м), тыловую (березитовую) (до 1,0...1,5 м) зоны (табл. 1). На внутренней границе фронтальной зоны полностью растворяются цветные минералы исходных пород (амфиболы, пироксены, биотит), хлоритовой (эпидотовой) зоны хлорит (эпидот), альбитовой зоны – альбит. В объемах ореолов в целом общая масса минеральных новообразований (табл. 1) нарастает от фронтальной зоны к тыловой, достигая в последней максимума без уменьшения числа минеральных фаз. В объемах промежуточных зон массы метасоматических минералов, исчезающих на их внутренних границах, – хлорита (эпидота), альбита – лавинообразно нарастают вблизи последних, причем возрастает магнезиальность-железистость хлоритов, цоизит замещается эпидотом. От фронтальной к тыловой зоне изменяются составы карбонатов – обычный кальцит замещается доломитом, анкеритом, сидеритом, появляются сульфиды.

- Таблица 1. Порядок минеральной зональности метасоматических ореолов мезотермальных месторождений золота Южной Сибири
- **Table 1.**Order of mineral zonality of metasomatic haloes in<br/>mesothermal gold deposits of South Siberia

Минеральные зоны Mineral zones	Минералы/Minerals
Фронтальная Frontal	Кварц + серицит + лейкоксен + рутил + магнетит ± пирит ± кальцит + альбит ± кероген ± хлориты ± цоизит ± <u>актинолит</u> ± <u>тремолит</u> Quartz + sericite + leucoxene + rutile + magnetic iron oxide ± pyrite ± calcite + al- bite ± kerogen ± chlorite ± zoisite ± <u>acti- nolite</u> ± tremolite
Хлоритовая (эпидотовая, эпидот-хлоритовая) Chloritic (epidotic, epidote-chloritic)	Кварц + серицит + лейкоксен + рутил + магнетит + пирит $\pm$ кальцит $\pm$ доломит + альбит $\pm$ кероген $\pm$ <u>хлориты</u> $\pm$ <u>цоизит</u> $\pm$ <u>клиноцоизит</u> $\pm$ <u>эпидот</u> Quartz + sericite + leucoxene + rutile + magnetic iron oxide $\pm$ pyrite $\pm$ calcite $\pm$ do- lomite + albite $\pm$ kerogen $\pm$ <u>chlorites</u> $\pm$ <u>zoi-</u> <u>site</u> $\pm$ <u>clinozoisite</u> $\pm$ <u>epidote</u>
Альбитовая Albitic	Кварц + серицит + лейкоксен + рутил + магнетит + пирит ± кальцит ± доломит- анкерит ± сидерит ± апатит ± кероген + <u>альбит</u> Quartz + sericite + leucoxene + rutile + magnetic iron oxide ± pyrite ± calcite ± do- lomite-ankerite ± siderite ± apatite ± kero- gen + <u>albite</u>
Тыловая Interior	Кварц + серицит + лейкоксен + рутил + магнетит + пирит ± кальцит ± анкерит ± сидерит ± брейнерит ± апатит ± кероген Quartz + sericite + leucoxene + rutile + magnetic iron oxide ± pyrite ± calcite ± an- kerite ± siderite ± breunnerite ± apatite ± kerogen

В структурах рассланцевания в толщах черных сланцев с множеством субпараллельных швов метасоматические колонки приобретают структуру «слоеного пирога» – минеральные зоны в них часто чередуются в разрезе в разных сочетаниях с усилением изменений в обрамлении швов и ослаблением их до уровня хлоритовой (эпидотовой) и даже фронтальной зоны по мере удаления от швов.

Преобразования минерального состава околотрещинных пород происходят посредством трещинно-поровых породно-флюидных взаимодействий в условиях встречной концентрационной диффузии компонентов в единой гидравлически связанной системе «трещинный раствор – поровый раствор» [19]. Согласно балансовым расчетам (табл. 2), в формирующиеся метасоматические колонки поступают и фиксируются в них дополнительные к имеющимся в породах массы калия, восстановленной серы, углекислоты в количествах, не превышающих необходимые для того, чтобы связать в твердую фазу свободные и освобождающиеся при растворении минералов катионы и анионы [19]. Компоненты диффундируют до хлоритовой (калий) и даже фронтальной (углекислота, сера) зоны включительно, причем массы их постепенно снижаются по мере удаления от «возмущающего» объекта - трещинного флюида. Напротив, преимущественно из внутренних зон удаляются почти полностью натрий и до 50 мас. % кремния; последний после инверсии щелочного режима флюида в кислотный образует среди метасоматитов кварцевые жилы и прожилки. По минералого-петрохимическим чертам [20] все метасоматические колонки представляют сочетание березитовой в тыловых зонах и пропилитовой в периферийных метасоматических формаций, обычное, как отмечалось, в мезотермальных месторождениях золота [21].

Таким образом, приведенные факты, демонстрирующие причинно-следственные связи всех составляющих апочерносланцевой метасоматической колонки как единого ансамбля минералогопетрохимических зон, образованных в каждом месторождении в рамках одного породо-рудообразующего процесса, доказывает принадлежность так называемых «субфаций регрессивного регионального метаморфизма (гидратации)» к пропилитовой метасоматической формации. Реальный аллохимический профиль апосланцевых метасоматических колонок не вписывается в современное представление о метаморфизме как явлении изохимическом в объеме метаморфизуемых пород [6]. Это снимает противоречие, которое используется для противопоставления месторождений золота в черных сланцах месторождениям, образованном в несланцевом субстрате [3, 15].

При метасоматических преобразованиях черных сланцев, в том числе в зальбандах золоторудных кварцевых жил и многочисленных прожилков, как правило, сохраняется их черный цвет вследствие восстановленного режима флюидов в условиях обилия в породах восстановителя - керогена. Вместе с тем в рудовмещающих толщах черных сланцев фиксируются полоски в разной степени (до серого, светло-серого цвета) осветленных частично окисленных метасоматитов, образованных, очевидно, на путях фильтрации струй окисленных флюидов, а также мощные (до 10...12 м) залежи метасоматитов в составе трех минералого-петрохимических зон - березитовой, альбитовой, хлоритовой с присущими им цветами и оттенками - от светло-серого до бледно-зеленого. Кероген в этих породах полностью окислен. Флюиды в этих случаях обладали высоким окислительным потенциалом. Метасоматические колонки в обрамлении соседних золоторудных кварцевых жил или в минерализованных зонах среди алюмосиликатных пород (гранитоидов, ультраметаморфитов), прорывающих толщи черных сланцев, например, в Ке**Таблица 2.** Баланс (вынос-, привнос, %) петрогенных элементов в зональных околорудных метасоматических ореолах мезотермальных месторождений золота Южной Сибири

**Table 2.**Balance (decrease, augmentation, %) of petrogenous elements in zone near-ore metasomatic haloes in mesothermal gold<br/>deposits of South Siberia

Минеральная	я Химические элементы/Chemical elements													
зона, подзона	<i>c</i> :					_						_		Δ
subzone	SI	AI	K	Na	5.	C,	Ca	Ng	Fe	Fe		P	Win	
1. Месторождение Ирокинда/Irokinda deposit													<u> </u>	
1.1. Гранит мигматитовой выплавки, AR <sub>2</sub> (3)/Granite of migmatitic melting, AR <sub>2</sub> (3)														
By (5)	0	0	-10	-10	+	20	20	0	0	10	10	50	-60	1,2
Ви (6)	0	0	-10	0	+	220	70	30	30	70	20	110	0	3,1
X (9)	-10	10	-40	40	0	500	70	60	0	60	-10	210	-50	6,9
A (8)	0	0	-20	-10	+	870	10	60	20	50	70	250	10	4,5
Вн (7)	-10	10	20	-90	+	2400	200	220	100	230	250	650	30	18,8
	1.	2. Фельз	итовый і	микрогр	анит-пор	офир, РZ	:₃ (2)/Fel	sitic micr	ogranite	-porphyr	y, PZ₃ (2)	)		
X (4)	-10	10	10	0	-60	140	120	180	170	60	280	190	210	12,6
A (6)	-30	10	70	-50	20	300	240	330	330	80	500	310	330	27,0
Вн (6)	-30	20	160	-90	1900	390	350	390	210	450	520	230	360	36,8
	2.1. /	Альманд	2 ин-двусл	. Кедров 1юдяной	вское ме плагиог	сторожд нейс, РZ	ение/Ке 3 (1)/Alm	drovskoe andine-t	e deposit wo-mica	ı plagiogr	neiss, PZ₃	a (1)		
By (1)	-2	2,8	66	-55	-49	-48	-14	10	44	37	-12	143	-27	7,0
X (1)	-4	8,4	14	-21	160	-27	36	-48	22	35	10	68	-35	6,0
Вн (1)	-48	-46	27	-96	2140	1330	716	439	65	61	98	653	42	45,0
		2.2. Ква	рцевый	циорит,	граноди	орит, РZ	, ₃(6)/Qu	artz diori	ite, grand	diorite, l	PZ₃ (6)	1	1	I
X (16)	0	0	0	0	1010	940	0	0	0	-10	0	0	10	4,0
A (6)	-10	-10	20	-10	3170	2070	30	50	60	-30	90	50	40	12,0
Вн (1)	-50	-20	40	-80	4270	4700	220	240	170	320	170	160	240	41,0
Углеродистые г	іолевоші	пат-квар	цевые сл	анцы ке	дровско	й свиты,	R₃ Carbo	, onaceous	feldspat	hic-quar	tz slates	of kedrov	/skaya su	iite, R₃
. (1)			2.3	3. Метаал	певропес	счаник (1	l)/Metaa	leurosan	dstone (	1)				100
A (1)	-1/	4,9	248	-34	+	1905	33	1053	282	340	82	300	3/4	18,0
Вн (1)	-39	8,8	445	-93	+	6913	880	1/81	44/	125	/3	6/2	347	43,0
			3. Ме	сторожд	ение Чер Аповской	отово Ко и свиты П	рыто/Cr PB./Carbo	iertovo K	oryto de. foldspatl	posit pic-quart:	z clatos o	f mikhavl	ovekava e	uito PR.
лиеродистые пол	свошна	з.1. k	Срупнозе	ернистый	і метаал	евролит	(5)/Coa	rse graine	ed metaa	lleurolite	(5)	i mintria yr	ovskuju s	unc, m
У (2)	0	0	0	-10	-30	-10	50	20	0	30	10	0	0	2,9
X (8)	-20	-30	-30	-70	120	1400	1180	100	70	10	540	840	560	29,7
Вн (1)	-40	-30	-10	-90	0	2800	1920	170	30	-90	570	900	2110	43,4
		3.2.	Мелкоз	ернисты	й метапе	счаник (	(5)/Smal	l grained	metasar	dstone (	5)			
У (1)	0	0	-30	80	180	40	30	10	0	-20	30	-30	100	3,5
У (3)	0	10	-20	10	130	100	80	120	30	70	20	0	150	6,5
X (6)	-40	0	-20	-70	430	1910	1400	330	160	30	820	890	1750	34,9
Вн (1)	-30	-10	-10	-90	10	1980	1260	260	110	180	790	870	3620	32,5
		3.3.	Разнозер	нистый	метапесч	наник (1)	/Differe	nt graine	d metas	andstone	(1)			-
У (1)	0	0	70	-70	1130	10	-40	110	60	90	30	-50	0	7,94
X (4)	-30	-10	0	-85	1640	1370	510	420	240	80	840	450	600	31,4
Вн (1)	-50	-30	-10	-90	6570	3180	1300	690	250	490	490	640	4600	55,6

Примечание. 1) Минеральные зоны и подзоны околорудных метасоматических ореолов: Ву, Ви – подзоны умеренного и интенсивного изменения фронтальной зоны, У, Х, А, Вн – соответственно углеродистая, хлоритовая, альбитовая, тыловая зоны. 2) S<sup>-</sup> – сера сульфидная, С₀ – углерод окисленный (карбонатный), «+» – привнос S при содержании ее в исходной породе ниже предела чувствительности анализа. 3) В скобках – число проб, участвующих в расчете средних. 4) Δ – удельная масса перемещенного (привнесенного и вынесенного) вещества в процентах к массе вещества исходных пород в стандартном геометрическом объеме 10000 Å<sup>3</sup>. 5) Полные химические силикатные анализы горных пород выполнены в Центральной лаборатории ПГО «Запсибгеология» и в Западно-Сибирском испытательном центре (г. Новокузнецк) под руководством И.А. Дубровской и Г.Н. Юминовой.

Note. 1) Mineral zones and subzones of near-ore metasomatic haloes: By,  $B\mu$  are the subzones of moderate and intensive alteration of frontal zone, Y, X, A,  $B\mu$  are the carbonaceous, chloritic, albitic, interior zones, correspondingly. 2) S' is the sulfide sulfur,  $C_0$  is the oxidized (carbonate) carbon, «+» is the S input at its content in the original rock lower than the analysis detection limit. 3) A number of samples, taken for calculating the average, are in brackets. 4)  $\Delta$  is the specific weight of the removed (supplied and remoted) substance in percent to the weight of the substance of the original rocks in standard geometric measurment 10000 Å<sup>3</sup>. 5) Completed chemical silicate rock analysis were carried out in Central laboratory of «Zapsibgeologiya» and in Western Siberian test centre (Novokuznetsk) under the direction of I.A. Dubrovskaya and G.N. Yuminova.

дровском, Каралонском месторождениях, в тыловой зоне всегда сложены светло-серым (до белого) березитом.

#### Кремний как индикатор кислотного и щелочного режимов в системе «порода – металлоносный раствор».

Кремний, растворимый в щелочной и нерастворимый в кислотной средах [22], пригоден для реконструкции соответствующего режима в процессе функционирования последовательных порций создающих рудно-минеральные комплексы металлоносных флюидов. Тот факт, что образование каждого рудно-минерального комплекса в рудных телах начинается с отложения кварца, свидетельствует о начальном щелочном режиме каждой новой порции заполнявшего рудовмещающую структуру и доставлявшего в нее извне кремний флюида, инверсия которого в кислотный сопровождалась переходом кремния в твердую фазу – кварц.

Начальный щелочной режим каждой новой порции флюида обеспечил растворение кварца, например, в бескарбонатных полевошпат-кварцевых, существенно кварцевых углеродистых сланцах кедровской, водораздельной, михайловской свит и вынос кремния в сумме до 50 мас. % от массы его в исходных породах в разломы-трещины (табл. 2) с последующим, после инверсии режима в кислотный, отложением кварца. Такую операцию мог осуществлять флюид, стерильный в отношении кремния, из чего следует вывод о местном породном его источнике. Согласно балансовым расчетам, масса извлекаемого из тыловых зон метасоматической колонки кремнезема сопоставима с массой кварца, слагающего в колонке осевую зону – кварцевую жилу [23]. Вместе с тем это решает проблему пространства для карбонатов, содержание которых в метасоматитах апосланцевых тыловых зон рудовмещающих метасоматических колонок достигает многих десятков об. %. Необходимый для растворения и миграции из пород кремния щелочной режим поровых растворов обеспечивается высокой активностью щелочей - встречной диффузией калия из трещинных растворов в поровые с фиксацией в сериците и натрия – в обратном направлении с альбитизацией пород в надрудном пространстве или рассеиванием.

Однако существуют рудоносные метасоматические колонки пропилит-березитового профиля, образованные в высококремнистых, в том числе существенно кварцевых породах, из тыловых зон которых на околорудных уровнях кремнезем не удален даже частично. К числу таких пород относятся, например, гранитоиды в массивах муйского, конкудеро-мамаканского, кодарского, падоринского, холбинского и других комплексов, вмещающие золоторудные кварцевые жилы в месторождениях Западном, Богодиканском, Верхне-Сакуканском, Зун-Оспа [24], крупные дайки гранит-порфиров, кварцевых порфиров, гранит-пегматитов. Многочисленные зерна кварца в апогранитных березитах сохранились в их присущих исходным породам формах и размерах, например в форме крупных овальных («оплавленных») порфировых выделений, обычных в кварцевых порфирах.

Очевидно, растворению кварца препятствовал не кислотный режим флюидов, в противном случае необходимый для образования реально существующих кварцевых жил нерастворимый в кислотных средах кремнезем не поступил бы с растворами в область рудообразования. Причиной явилось насыщение (пересыщение) поступающих щелочных флюидов солями кремневой кислоты, экстрагированной из пород на более глубоких горизонтах земной коры на путях фильтрации флюидов. Представление о породных, а не магматических, источниках кремнезема в данных случаях также предпочтительно, так как участвующие в образовании многих месторождений флюиды поднимаются до околорудных уровней стерильными в отношении кремния и только при этом условии обеспечивают его перемещение из боковых пород в рудные тела - кварцевые жилы и минерализованные зоны.

Доказываемые приведенными фактами сценарии функционирования трещинно-поровых породно-флюидных систем исключают участие в них остаточных гранитных расплавов и солевой расплавной фазы [25]. Ничто не напоминает также существование последних в веществе вакуолей в кварцах и других минералах руд. Гидротермальное породо-рудообразование осуществляется посредством взаимодействия с породами гидротермальных металлоносных слабо-умеренно соленых растворов [10, 11], происхождение которых обсуждается ниже.

Мономинеральный кварцевый, двухминеральный кварц-серицитовый составы соответственно осевой и тыловой зон или полиминеральный состав обеих зон формируются в околорудных метасоматических ореолах (колонках) в мезотермальных месторождениях золота?

Околорудные (рудовмещающие) гидротермальные метасоматические ореолы, в отличие, как отмечалось, от обширных ареалов регионального зонального метаморфизма нагревания, контролируются зонами высокой проницаемости, относительно локальны и обладают минералого-петрохимической зональностью, в структуре которой рудные тела занимают вполне закономерное положение. Разработанная Д.С. Коржинским на основе законов термодинамики теория метасоматической зональности [4] опирается на явление дифференциальной подвижности химических компонентов, влияющей, в частности, на их способность находиться в растворенном состоянии и мигрировать в зависимости от сочетания термодинамических и физико-химических режимов в трещинно-поровых породно-флюидных системах. Среди участвующих в породо-рудообразовании компонентов предложено различать наиболее подвижные (вода,
углекислота), весьма подвижные при всех условиях (сера, хлор, натрий, калий) и подвижные при определенных условиях (кислород, кремний, магний, кальций, железо), инертные при всех условиях (алюминий, фосфор, титан) [4, 26].

Инициирующий и обеспечивающий метасоматический процесс поступающий, в отличие от эволюционной гипотезы, порциями в разлом (трещину) металлоносный флюид образует каждый раз с поровым раствором боковых пород единую гидравлическую систему. Застойный режим в ней доказывается многократно повторяющимися во многих месторождениях золота фактами прямой зависимости высокой золотоносности (металлоносности) метасоматитов тыловых зон метасоматических колонок в участках, смежных с рудными столбами в трещинных рудных телах – кварцевых жилах, минерализованных зонах, и низкой золотоносности метасоматитов в обрамлении слабооруденелых участков рудных тел [10]. Эти факты исключают предписываемую теорией фильтрацию флюидов по трещинам в сочетании с застойным режимом поровых растворов.

Согласно теории метасоматической зональности, подвижность компонентов возрастает в направлении к возмущающему объекту – трещинному раствору – синхронно с возрастанием температуры в системе, усиливающей их активность. Это должно сопровождаться переходом в подвижное состояние последовательно одного компонента за другим, удалением их из системы, ступенчатым уменьшением числа минеральных фаз в формирующейся метасоматической колонке вплоть до образования мономинеральной тыловой (осевой) зоны. Тенденция к этому действительно видна в порядке минералого-петрохимической зональности околорудных (рудовмещающих) метасоматических колонок, в которых промежуточные зоны названы по названию минералов, исчезающих в более тыловых зонах (табл. 1).

На этом соответствие реальных природных колонок теоретической модели кончается. Уменышение числа минеральных фаз вплоть до мономинеральной зоны в тридцати метасоматических колонках, образованных в разнообразных по составам и происхождению породах шестнадцати разновозрастных поименованных выше месторождений, включая толщи черных сланцев, не достигается – березит тыловой зоны сложен тремя главными по массе минералами (кварцем, серицитом, карбонатами) с примесью других новообразованных минералов (табл. 1). Смежная с тыловой зоной осевая кварцевая жила (минерализованная зона) сложена теми же минералами с б?льшей массой рудных минералов.

Недавнее разделяемое многими популяризаторами метаморфогенной гипотезы рудообразования в черных сланцах утверждение о том, что березитовая колонка должна включать тыловую кварцсерицитовую породу и осевую зону окварцевания, в противном случае процесс нельзя назвать березитизацией [15], – это всего лишь дань теории, но не отражение реальной ситуации. Последняя была подчеркнута в обобщающей работе еще полстолетия назад [20] – березит – порода полиминеральная, продукт калиево-сернисто-углекислотного метасоматизма. Авторов публикации нельзя назвать дилетантами, это были профессионалы высшей пробы.

Причины несоответствия теоретической модели природным метасоматическим колонкам очевидны – в теории метасоматической зональности не учтены встречная диффузия компонентов и пульсационный режим функционирования породно-флюидных систем.

Концентрационно-диффузионный механизм массопереноса при околотрещинном гидротермальном метасоматизме, в частности, пропилитберезитового профиля, доказывается результатами балансовых расчетов миграции компонентов в направлениях выравнивания их содержаний в метасоматитах, образованных в гетерогенной – дифференцированной по химическому составу - среде (рис. 2) [19]. Наряду с выносом из порового раствора в трещинный натрия и части кремния навстречу из трещинного раствора в поровый диффундируют калий, сера, углекислота, элементы фемофильной ассоциации (табл. 2), металлы (табл. 3), которые фиксируются в карбонатах, сульфидах и других минералах. Глубина проникновения в боковое пространство определяется скоростью диффузии их ионов, молекул, некоторые (углекислота, сера) достигают фронтальной зоны метасоматических колонок. Границы их распространения не совпадают с границами обусловленных дифференциальной подвижностью компонентов минералого-петрохимических зон, и это усложняет картину минералого-петрохимической зональности. Пульсационный режим поступления в область породорудообразования металлоносных флюидов с иным составом растворенных соединений в каждой последующей порции и, как следствие, пространственное совмещение последовательных минеральных ассоциаций (комплексов), особенно крупнообъемное в тыловых зонах наиболее интенсивных преобразований пород в метасоматических колонках, наряду со встречной диффузией компонентов, исключает мономинеральный состав и тыловой зоны метасоматитов, и рудного тела в осевой зоне.

Учесть все перечисленные сложности в эксперименте, тем более воспроизвести их в условиях эксперимента, вероятно, невозможно, поэтому в оценке теории метасоматической зональности следует ориентироваться на то, что создала природа.

В формировании чрезвычайно сложного распределения минеральных новообразований в околорудном пространстве гидротермальных месторождений золота природой задействовано, таким образом, как минимум, три механизма миграции компонентов: их дифференциальная подвижность и концентрационная диффузия, действующие од-



Рис. 2. Распределение петрогенных элементов во фронтальной (нулевой) и тыловой зонах околожильных метасоматических ореолов Ирокиндинского месторождения. По оси ординат – содержание компонентов в исходных породах нулевой зоны и подзоны слабого изменения фронтальной зоны ореолов, по оси абсцисс – атомные количества привноса (+), выноса (−) элементов в березите и листвените тыловой зоны в процентах к атомным количествам их в исходных породах в стандартном геометрическом объеме 10 000 <sup>29</sup>. Одна фигуративная точка представляет индивидуальную метасоматическую колонку во фронтальной и тыловой зонах, ее координаты рассчитаны на основе объемно-атомного метода петрохимических пересчетов как среднее из 2<sup>−</sup>5 проб в каждой зоне. Исходные породы: альмандин-диопсид-двуполевошпатовый гнейс (1), альмандин-двуслюдяной гнейс (2), кальцифир (3), гранит мигматитовой выплавки (4), амфиболит (5), фельзитовый микрогранит-порфир (6), дайка, сопровождаемая двумя золотоносными жилами

Fig. 2. Distribution of petrogenous elements in frontal (zero) and interior zones of near-vein metasomatic haloes of Irokindinskoe deposit. The content of the components in the original rocks of the zero zone and subzone of slight alternation of halo frontal zone is along Y-axis, the atomic amounts of augmentation (+), decrease (-) of the elements in beresite and listvenite of the interior zone in percent to their atomic amounts in the original rocks in standard geometrical volume 10 000 ?<sup>3</sup> are along X-axis. One imaging point represents the individual metasomaic column in frontal and interior zones, its coordinates are calculated as an average of 2–5 samples in each zone based on volume-atomic method of petrochemical reestimation. The original rocks: almandine-diopside-bi-feldspathic gneiss (1), almandine-two-mica gneiss (2), calciphyre (3), granite of migmatitic melting (4), amphibolite (5), felsitic micro-granite-porphyry (6) dyke, attended with two gold-bearing veins

новременно, и пульсационный режим функционирования природно-флюидных систем. Создать более или менее упорядоченную картину распределения вещества из них способен, как представляется, механизм дифференциальной подвижности компонентов. Именно он использован для реконструкции структуры околорудных (рудовмещающих) метасоматических колонок. Приведенная выше (табл. 1) схема метасоматической минералого-петрохимической зональности представляет собой каркас, несущий все другие минеральные, например карбонатные, ассоциации, образование которых обязано и другим упомянутым механизмам массопереноса.

Инертны при всех или подвижны при определенных условиях Ti, P, Al в гидротермальных рудообразующих системах?

Вопреки задолженному в теории метасоматической зональности представлению об инертности титана, фосфора, алюминия при всех условиях природа демонстрирует подвижность при определенных условиях, способность к миграции и накопление их в ассоциации с рядом других фемофильных элементов (K, Mg, Fe, Ca, Mn) в тыловых зонах пропилит-березитовых, в том числе апочерносланцевых, колонок с образованием контрастных аномалий (табл. 2). Привнос в малоглиноземистые породы алюминия достигает сотен процентов (рис. 2). Поступающие преимущественно в тыловые зоны дополнительные к исходным породам количества перечисленных элементов фиксируются в сериците (калий, алюминий), магнезиально-железистых карбонатах (Ca, Mg, Fe, Mn), хлорите или эпидоте (Mg, Fe), рутиле, лейкоксене (Ti), апатите (Р). Масса поступающего фосфора обеспечивает образование апатита даже в золотоносных кварцевых жилах, например, в Сухоложском месторождении [27].

Максимальные концентрации фемофильных элементов фиксируются в метасоматических колонках в ближнем обрамлении глубинных разломов, в частности Келянского, Тулдуньского, Кадали-Сухоложского, контролирующих размещение в земной коре Ирокиндинского, Кедровского, Сухоложского и других месторождений золота.

Особенно информативно поведение Ті и Р, концентрации которых в березитах снижаются до кларковых по мере удаления от разломов на расстояниях 1,0...1,5 км [28]. Синхронно снижается содержание Ті в метасоматическом пирите березитов, средние содержания и запасы золота в рудных телах. Эти факты доказывают раствороподводящую функцию глубинных разломов и инверсию щелочного, наиболее благоприятного для переноса обоих элементов, режима поступающих по разломам металлоносных флюидов в кислотный. Оба элемента в эндогенных процессах – геохимические спутники, генетически, металлогенически тесно связанные с базит-гипербазитовыми и производными из них щелочными мантийными расплавами. Отвечающие им плутонические породы обладают наивысшими из всех пород кларками этих элементов, оба элемента образуют высокие, вплоть до промышленных, концентрации – апатитовые со значительной (до 30 %) примесью сфена руды в щелочных массивах типа Хабинского, титано-магнетитовые с примесью апатита руды в Волковском габбро-пироксенитовом массиве на Урале, в карбонатитах Ковдорского комплекса ультраосновныхщелочных пород на Кольском полуострове и в других месторождениях.

Участие контрастных аномалий этих и других фемофильных элементов в составе золотоносных березитов в обрамлении глубинных разломов не может оцениваться иначе, как признак генерации создающих месторождения золота металлоносных флюидов в глубинах аномальной мантии

Породный источник золота, сосредоточенного в рудах месторождений, образованных в толщах черных сланцев, – реальность или миф?

Условия образования гидротермальных месторождений золота по четырем известным сценариям – гранитогенному, базальтогенному, метаморфогенному, полигенному – обсуждались ранее [29].

Прошедшая несколько трансформаций за шестидесятилетнюю историю метаморфогенная гидротермальная гипотеза, предполагающая породный источник золота, в последние полтора-два десятилетия утратила главный аргумент, с которого начиналась и согласно которому повышенная или высокая (до граммов в тонне породы) дорудная золотоносность черных сланцев есть предпосылка, обязательное условие рудообразования. В оценке содержания золота в черных сланцах достигнут такой хаос [30], что авторы современных публикаций, как правило, не приводя собственных аналитических данных, вероятно, чтобы не усиливать его, предпочитают ссылаться на повышенную их золотоносность как на доказанный факт, что не соответствует реальности [29, 30]. Вероятно, как жест отчаяния следует также воспринимать попытку некоторых авторов доказать достаточность кларковых содержаний золота в черных сланцах для образования его промышленных месторождений [31].

Причина хаоса, то есть многовариантных оценок разными авторами публикаций дорудных содержаний золота от кларковых до промышленных в одних и тех же толщах черных сланцев в золотоносных районах и месторождениях, заключается в неадекватном, упрощенном понимании большинством участников целей геохимии и содержания геохимических исследований, призванных, по определению отцов-основателей В.И. Вернадского и А.Е. Ферсмана, реконструировать геологическую историю химических элементов в оболочках планеты.

Определяются итоговые содержания золота и других металлов в околорудном пространстве чер-

носланцевых толщ и за пределами месторождений, после чего интерпретация полученных данных сопровождается попытками оценить их происхождение. Нередко оценки сопровождаются сравнением полученных результатов с содержаниями металлов в современных осадках морей и океанов с акцентом на те, которые включают горизонты, обогащенные гидротермально-осадочной, вулканогенно-осадочной золотоносной минерализацией в рифтовых структурах дна [32]. Как правило, в работах разделяющих идеи метаморфогенной гипотезы специалистов выводы без необходимого в каждом конкретном случае обоснования сводятся к признанию дорудного, на этапе седиментации, накопления золота (металлов) с последующим заключением о местном (породном) их источнике при рудообразовании. Рудообразующая роль приоритетного в согласии с гипотезой регионального регрессивного метаморфизма заключается в перераспределении золота (металлов) из обогащенных им (ими) горизонтов или в концентрировании рассеянных в сланцах сверхкларковых количеств металлов в рудные тела.

Однако не акцентируется внимание на отсутствии сингенетичных осадкам горизонтов золотоносной минерализации среди монотонных черных сланцев, вмещающих крупнейшие контролируемые секущими толщи разломными структурами рудные залежи, например, в уникальном месторождении Сухой Лог, соседних с ним крупных месторождениях Вернинском, Невском, в крупном месторождении Чертово Корыто в Патомском нагорье и других. Природа, создавая эти месторождения, как-то обходилась без обогащенных золотом горизонтов. Вопрос о том, повышенные (высокие) содержания золота в околорудном пространстве черных сланцев – следствие или предпосылка рудообразования, до сих пор остается открытым вследствие, как отмечалось, многовариантных оценок дорудной золотоносности сланцев. Популярная идея о многоэтапном накоплении золота в рудных телах [33-39] не подкрепляется необходимыми для этого фактами, мерой и числом, доказывающими обогащение пород золотом на каждом этапе. По этой причине идея напоминает декларацию о намерениях.

Золото и сопровождающие его металлы на современном уровне знаний не способны самостоятельно рассказать о своей геологической истории. Реконструировать ее возможно посредством петрологического исследования горных пород – через диагностику минеральных ассоциаций (комплексов) – индикаторов (вещественных следов), которые природа оставила в горных породах на этапе седиментации и на каждом последующем этапе их преобразований. В результате петрологического исследования горных пород создается многоуровневая система геохимических выборок для расчетов статистических параметров распределения в горных породах каждого вида (разновидности) металлов и оценки условий, масштабов возможного рассеивания или концентрирования последних на каждом этапе.

Система включает представляющие этап образования осадочных пород выборки нижнего уровня по литологическим видам (разновидностям). Однако приходится констатировать, что даже в относительно молодых палеозойских толщах черных сланцев случаи секущего стратификацию положения периферийной наиболее низкотемпературной изограды, отделяющей ареал зонального регионального метаморфизма нагревания от не затронутых последним осадочных толщ, вероятно, – большая редкость. Допалеозойские толщи черных сланцев, в которых залегает большинство месторождений «сланцевого типа», не затронутые региональным метаморфизмом нагревания в обсуждаемых золоторудных районах, не сохранились.

Поскольку большинство месторождений золота образовано в периферийной относительно низкотемпературной мусковит-биотитовой зоне ареалов регионального метаморфизма нагревания, выборки более высокого уровня представлены не затронутыми последующими гидротермальными околорудными изменениями породами этой зоны, метаморфизованными настолько слабо, что сохранили первичную обломочную структуру. Учитывая изохимический режим метаморфизма, не будет ошибкой считать содержания золота в породах этой зоны отвечающими кларковым для соответствующих видов пород (песчаников, алевролитов, аргиллитов), что подтверждается результатами атомноабсорбционного анализа, – реальные содержания в пробах метаморфизованных пород (табл. 3) соотносятся со справочными кларковыми (0,5...3,0 мг/т) содержаниями золота в породах, не затронутых изменениями.

Выборки верхнего уровня включают пробы тех же метаморфизованных пород по видам (разновидностям), но подвергшихся околорудным гидротермальным изменениям на уровнях минералого-петрохимических зон околорудных (рудовмещающих) метасоматических пропилит-березитовых колонок. На этом этапе околорудного метасоматизма происходит накопление металлов – геохимических образующих сплав спутников – Au, Ag, Hg, дифференцированное по минералого-петрохимическим зонам (табл. 3).

На дальней периферии метасоматических колонок содержания металлов отвечают кларковым, но в направлении к их тыловой зоне, по мере усиления метасоматических преобразований пород, содержания, дисперсия распределения металлов, золото-серебряное отношение возрастают, достигая максимума в тыловой зоне. Такое распределение параметров, в частности снижение контрастности геохимических аномалий по мере удаления от заполнявшщих трещины металлоносных флюидов, согласуется с концентрационно-диффузионным механизмом массопереноса [19] – металлы диффундируют из трещиных металлоносных поступивших извне флюидов по поровым растворам Таблица 3. Оценка параметров распределения рудогенных элементов и корреляционных связей золота с рудогенными элементами в минеральных зонах околорудных метасоматических ореолов мезотермальных золоторудных месторождений Северного Забайкалья

Таблица 3. Оценка параметров распределения рудогенных элементов и корреляционных связей золота с рудогенными элементами в минеральных зонах околорудных метасоматических ореолов мезотермальных золоторудных месторождений Северного Забайкалья

	Минеральные зоны [число проб]/Mineral zones [amount of samples]						
	Параметры ра-	Фронтальная/Frontal			Хлоритовая	Альбитовая	Тыповая
Элементы	спределения	Подзоны изменения Subzones of changes					
Elements	Distribution pa- rameters	Слабого Slight	Умеренного Moderate	Интенсивного Intensive	Chloritic	Albitic	Interior
	Месторождени	е Ирокинда/Irok	inda deposit Аль	мандин-диопси	д-двуполевошпа	атовые гнейсы (А	(R <sub>2</sub> )
		Alma	andine-diopside-l	bi-feldspathic gne	eiss (AR <sub>2</sub> )		
Au	$\overline{x}\Gamma(\overline{x})$	0,7(1,1)[29]	0,6(0,7)[48]	0,7(0,7)[29]	0,7(0,8)[23]	16,5(47,0)[65]	49,9(228,8)[169]
	t (s)	2,1(1,8)	1,5(0,3)	1,5(0,3)	1,4(0,3)	4,0(94,0)	5,7(646,0)
Ag	$\overline{x}\Gamma(\overline{x})$	35,7(43,9)	50,0(55,9)	60,3(85,3)	56,8(92,7)	153,1(222,0)	134,3(268,1)
	t (s)	1,8(36,8)	1,7(25,3)	2,2(95,1)	3,2(109,8)	2,3(239,8)	2,9(590,8)
	r (sr)	<b>0,73</b> (0,12)	0,02(0,20)	0,38(0,22)	<b>0,68</b> (0,14)	<b>0,82</b> (0,06)	<b>0,50</b> (0,12)
	Au/Ag	0,02	0,01	0,01	0,01	0,1	0,37
	$\overline{x}\Gamma(\overline{x})$	17,1(22,0)	15,6(18,2)	19,3(34,4)	21,7(34,8)	19,7(33,4)	28,7(55,2)
Hg	t (s)	2,0(17,0)	1,7(11,5)	2,4(56,5)	2,3(53,8)	2,6(47,0)	2,9(99,4)
	r (sr)	-0,07(0,19)	- <b>0,36</b> (0,13)	-0,10(0,18)	0,04(0,27)	0,05(0,11)	0,07(0,08)
Кедровское ме	сторождение/Ке	drovskoye deposit	Углеродистые г	олевошпат-квар	цевые песчано-а	алевросланцы ке	дровской свиты (R <sub>3</sub> )
	Ca	arbonaceous felds	pathic-quartz sa	ndyaleuroslates o	f kedrovskaya su	ite (R <sub>3</sub> )	
A.,	$\overline{x}\Gamma(\overline{x})$	1,2(1,6)[37]	0,7(1,5)[15]	1,1(1,7)[23]	1,8(2,6)[123]	3,9(6,9)[209]	5,8(15,3)[27]
Au	t (s)	2,1(1,5)	2,9(2,7)	2,7(1,6)	2,0(4,0)	2,8(9,5)	4,5(19,9)
	$\overline{x}\Gamma(\overline{x})$	26,7(32,1)	23,3(26,0)	56,6(91,7)	61,7(165,1)	135,8(223,4)	165,0(278,5)
٨٩	t (s)	1,9(20,9)	1,6(13,9)	2,6(116,6)	4,6(340,4)	2,6(359,5)	3,1(257,0)
Ag	r (sr)	0,001(0,2)	<b>0,79</b> (0,11)	0,22(0,21)	0,21(0,12)	0,11(0,09)	<b>0,44</b> (0,16)
	Au/Ag	0,04	0,03	0,02	0,03	0,03	0,04
Hg	$\overline{x}\Gamma(\overline{x})$	18,0(26,3)	28,3(34,7)	22,0(30,4)	24,5(34,1)	17,5(23,5)	30,5(36,0)
	t (s)	2,8(20,7)	2,1(18,7)	2,2(27,0)	2,4(30,1)	2,1(20,6)	1,8(21,4)
	r (sr)	<b>0,35</b> (0,16)	<b>0,50</b> (0,22)	0,20(0,21)	-0,15(0,12)	-0,11(0,08)	<b>0,58</b> (0,13)
Каралоно	ское месторожде	ние Углеродисть	іе полевошпат-к	кварцевые песча	но-алевро-слань	цы водораздельн	юй свиты (R <sub>3</sub> )
	Carl	bonaceous feldsp	athic-quartz sand	dyaleuroslates of	vodorazdelnaya s	uite (R <sub>3</sub> )	
Au	$\overline{x}r(\overline{x})$	1,0(1,1)[15]	-	1,6(2,0)[11]	2,0(2,8)[34]	2,0(3,5)[7]	24,7(73,5)[6]
	t (s)	1,6(0,4)		1,9(1,8)	2,4(2,6)	2,8(5,1)	5,6(100,9)
Ag	$\overline{x}\Gamma(\overline{x})$	25,1(35,1)		34,9(64,7)	45,6(65,1)	29,4(44,5)	53,3(60,2)
	t (s)	2,2(34,8)		2,9(99,3)	2,4(75,0)	2,9(39,9)	1,8(29,6)
	r (sr)	<b>0,56</b> (0,18)	н/д	<b>0,73</b> (0,14)	<b>0,52</b> (0,12)	<b>0,80</b> (0,13)	<b>0,70</b> (0,21)
	Au/Ag	0,04		0,04	0,04	0,07	0,4
Hg	$\overline{x}\Gamma(\overline{x})$	32,4(37,3)		47,0(49,0)	58,0(68,6)	42,2(61,6)	44,6(46,5)
	t (s)	1,8(19,2)		1,4(14,8)	1,7(61,4)	2,5(63,5)	1,4(16,3)
	r (sr)	0.12(0.25)		-0.007(0.30)	-0.22(0.16)	<b>0.55</b> (0.26)	-0.30(0.37)

Примечание. 1)  $\bar{x} \Gamma (\bar{x})$  – среднее соответственно геометрическое и арифметическое содержание, мг/т; t – стандартный множитель; s – стандартное отклонение содержаний, мг/т; r – коэффициент парной линейной корреляции элементов с золотом выше уровня значимости обозначен жирным шрифтом; sr – стандартное отклонение коэффициента корреляции; н/д – нет данных. 2) Содержание Au и Ag определялось атомно-абсорбционным методом (чувствительность 0,1 мг/т) в лаборатории ядерно-физических методов анализа вещества ОИГГиМ СО РАН (г. Новосибирск), аналитик В.Г. Цимбалист. Содержание Hg определялось атомно-абсорбционным методом (чувствительность 5 мг/т) в ЦЛ ПГО «Березовгеология» (г. Новосибирск) под руководством H.A. Чарикова. Оценка качества аналитических работ приведена в [10]. 3) Расчеты выполнены Н.П. Ореховым.

Note. 1)  $\overline{x}r(\overline{x})$  are the average geometric and arithmetic contents, correspondingly, mg/t; t is the standard factor; s is the standard content deviation, mg/t; r is the coefficient of pair linear correlation of the elements with gold, high than significance level, is in bold type; sr is the standard deviation of correlation ratio;  $\mu/\mu$  is n/a. 2) Au and Ag contents were determined by atomic-absorption method (sensitivity is 0,1 mg/t) in the laboratory of nuclear-physical substance analysis methods of the SB RAS (Novosibirsk), the analyst is V.G. Tsimbalist. Hg content was determined by atomic-absorption method (sensitivity is 5 mg/t) in «Berezovgeologiya» (Novosibirsk) under the direction of N.A. Charikov. The appraisal of the quality of analyses is introduced in [10]. 3) The calculations were carried out by N.P. Orekhov.

боковых пород, но фронтальной зоны, как правило, не достигают. Поэтому геохимические ореолы занимают меньшие объемы всех изученных метасоматических колонок, вписываются в последние. Максимальный уровень накопления металлов в тыловой зоне метасоматических колонок, прежде всего золота, коррелирует, как отмечалось, с их (его) содержанием в смежных участках кварцевых жил и минерализованных зон: в обрамлении рудных столбов содержания золота, например, достигают 1 г/т, иногда более, в обрамлении участков рудных тел с низкими содержаниями, например, в апочерносланцевых минерализованных зонах, как правило, не превышают десятков мг/т. Этот факт служит доказательством застойного, вопреки теории [1, 4, 26], гидродинамического режима и трещинных растворов в трещинно-поровых породнофлюидных системах, функционирующих в кристаллическом и черносланцевом субстрате.

Приведенные данные, единообразно повторяющиеся в обсуждаемых месторождениях, образованных в кристаллическом и черносланцевом субстрате, доказывают образование метасоматического, геохимического ореолов и рудно-минеральных комплексов в каждом месторождении в рамках одного гидротермального породо-рудообразующего процесса.

Вмещающие месторождения золота кристаллические породы, даже такие древние, как архейские ультраметаморфиты фундамента (Ирокинда) или раннепротерозойские гранитоиды кодарского комплекса (Верхне-Сакуканское месторождение), подверглись после образования только воздействию гидротермальных растворов на этапе рудообразования в позднем палеозое [10, 29]. Выделение околорудных метасоматических и геохимических ореолов в этих и подобных породах, оценка дорудной золотоносности пород на уровне кларков за пределами, как правило, локальных ореолов не вызывают вопросов. Выше показано что традиционное (десятилетиями) выделение многими в рудовмещающих толщах черных сланцев в числе других биотит-хлоритовой субфации регионального метаморфизма [3, 15-17 и др.] означает смешивание производных периферийной мусковитбиотитовой зоны предшествующего регионального метаморфизма нагревания с отделенными от него сотнями млн л «зеленосланцевыми» ассоциациями этапа рудообразования (пропилитами) метасоматическими по существу, метаморфическими (гидратации), по большому желанию. Во всех обсуждаемых месторождениях отказ от желания сопровождается оценкой чрезвычайно живучего представления о повышенной (высокой) дорудной золотоносности черных сланцев как мифического.

Гидротермальное рудообразование – следствие потенциальной рудоносности или металлогенической специализации гранитоидов (магматических комплексов)?

В течение двадцатого столетия и до сего времени среди большинства специалистов, изучавших и изучающих связи гидротермального рудообразования с магматизмом, считалась и считается заслуживающей внимания идея о генерации золотоносных флюидов в очагах гранитной магмы. Идея опирается на повторяющуюся в золотоносных районах разного возраста и геологического развития пространственно-временн?ю близость гидротермальных месторождений золота с гранитными плутонами, массивами, и на представление, скорее, убеждение, о возможности генерации необходимых для образования промышленных месторождений масс золотоносных флюидов только в крупнообъемных гранитоидных унаследованных плутонами, массивами очагах. Это убеждение не поколебали высказанные еще в середине прошлого века рекомендации известных ученых Ф.И. Вольфсона и В.Н. Котляра о необходимости изучения также и сопровождающих крупные тела гранитоидов малых интрузий – даек «второго этапа», и опубликованные вслед за тем данные о пространственно-временной близости последних с оловянными, вольфрамовыми, полиметаллическими рудами ряда гидротермальных (включая скарновые) месторождений Забайкалья и Приморья [30].

В многолетних поисках критериев генетических связей гидротермальных месторождений золота с гранитоидами приоритетное внимание уделялось изучению золотоносности последних с целью дифференциации плутонов, массивов на совокупности способных и неспособных генерировать металлоносные флюиды в достаточных объемах при отсутствии, однако, понимания того, что означает «достаточных». В итоге к началу семидесятых годов стало очевидно, что данный геохимический критерий не обеспечивает корректный результат, - между месторождениями золота (их присутствием, отсутствием, масштабами запасов) и нижекларковыми, нормативными, сверхкларковыми уровнями содержания золота в гранитоидах, в том числе поздних фаз внедрения, прямая, обратная корреляция отсутствует [29, 30]. Отсутствие корреляции выражается в том, что промышленные месторождения золота ассоциируют с гранитоидами, содержащими золото в нижекларковых количествах в одних районах, в сверхкларковых количествах – в других, либо в том и другом случаях месторождения неизвестны. Привлекаемые некоторыми авторами минералогические, петрохимические признаки связи оруденения с гранитоидами не получают корректной (одновариантной) интерпретации. Например, так называемое унаследование золотоносными кварцевыми жилами полевых шпатов гранитоидов может быть объяснено не генерацией золотоносных флюидов в гранитоидных расплавах, а диффузией, как отмечалось, Si, Na, Ca, подвижного, вопреки теории, алюминия из поровых флюидов в трещинные и фиксацией их в новообразованных полевых шпатах при заполнении трещин кварцем. Присутствие в вакуолях кварца рудных жил и гранитоидов распространенных в расплавах разных составов CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> и других не исключает возможности и вероятности генерации металлоносных флюидов не только в гранитных расплавах.

Очевидно, перечисленные обстоятельства, то есть несовершенство доказательной базы гранитогенной гипотезы, послужили причиной не только создания в середине прошлого столетия новых гипотез (метаморфогенной, полигенной), но и пересмотра парадигмы исследования проблемы. Последнее выразилось в замене по предложению Л.В. Таусона [2] представления о металлогенической специализации магматических комплексов представлением об их потенциальной рудоносности. Идея заключалась в том, что рудогенерирующая способность силикатных расплавов не изначально свойственна каждому создающему магматический комплекс определенного состава петрогенетическому процессу, а формируется в магматической камере при определенном благоприятном сочетании в ней термодинамических и физико-химических режимов функционирования расплавов. Для реализации новой методологии исследований разработаны тонкие методы реконструкции, диагностики режимов, обеспечивающих накопление золота во флюидах и истечение их из магматической камеры в верхнеинтрузивное, надинтрузивное, околоинтрузивное пространство. Сохранившее приверженность гранитогенной гипотезе сообщество в СССР, России и за рубежом дружно перешло на позиции новой методологии [14, 40-48 и др.].

В числе достигнутых результатов главное достижение – «привязка» дифференцированных по запасам металла гидротермальных месторождений золота к конкретным плутонам, массивам, – месторождений, квалифицируемых в англоязычной литературе как «intrusion-related», «plutonrelated» [40, 44 и др.]. В унаследованных этими плутонами, массивами магматических камерах посредством многопланового изучения минералов гранитоидов реконструируются условия, благоприятствовавшие генерации золотоносных флюидов, дальнейшую судьбу которых с учетом имеющихся фактов можно только предполагать.

Поскольку месторождения нередко образованы в апикальных частях массивов гранитоидов, следует констатировать, что золотоносные флюиды могли быть генерированы только в глубинах былых магматических камер, не вскрытых эрозией. Из этого следует, что породы, наиболее информативные для реконструкции условий функционирования расплавов на глубинах предположительной генерации флюидов доступны для отбора проб только в случаях возможных инъекций их в апикальные части плутонов, то есть ограничены в объемах. При этом известно, что расплавы – чрезвычайно динамичная субстанция и во время своего существования в интервалах до десятков млн л испытывают множество трансформаций, обусловленных дифференциацией, термо-бародиффузией, дегазацией, подтоком газов, расплавов в камеры извне и другими явлениями, вызывающими многократные многообразные изменения термодинамических, физико-химических режимов, в том числе в локальных объемах магматических камер, исчезающе малых в сравнении с объемами последних. Невозможно оценить объемы расплавов, в которых реконструируются признаки генерации металлоносных флюидов. Все это и, вероятно, многое другое может быть оценено на вероятностном уровне. Поэтому множество разнообразных диаграмм, «раскрывающих» генетические связи месторождений золота с крупными телами гранитоидов в большей степени отражают гипотетические представления их авторов, чем реальную способность расплавов генерировать металлоносные флюиды, способные создавать промышленные месторождения в достаточных для этого объемах.

Между тем, в мезотермальных месторождениях золота обнаружены факты, неизменно игнорируемые разработчиками представлений о генерации металлоносных флюидов в очагах гранитной магмы или неизвестные им, которые, мягко выражаясь, трудно объяснимы с позиций гранитогенной гипотезы. Совокупность этих взаимно дополняющих фактов составляет основу альтернативной гранитогенной гипотетезе концепции, содержание которой заключается в следующем.

Мезотермальные месторождения золота образуются в составе антидромных гранит-диорит-долеритовых флюдно-рудно-магматических комплексов, генерирующих золотоносные флюиды на позднем этапе их становления в условиях высокой активности очагов умеренно щелочных базальтовых расплавов [12, 29, 30]. Последовательность геологических событий от начала процессов становления комплексов до их завершения устанавливается на основе пересечений поздними образованиями ранних и признаков термического воздействия первых на вторые (рис. 3, 4). Один из примеров приведен ниже.

Аналог массивов палингенных гранитоидов Кедровская зрелая ультраметаморфическая очаговокупольная постройка с гранодиоритовым ядром (335±5 млн л) открывает процесс становления комплекса. Пересекающая ее на периферии мощная дайка диоритового порфирита, в свою очередь, пересекается дайкой умеренно-щелочного долерита, гидротермально измененного в экзоконтакте пересекающей ее золотоносной кварцевой жилы, в составе которой участвует ранняя генерация высокотемпературного кварца. Поступившая в область рудообразования ранняя (дорудная) порция умеренно щелочного базальтового расплава и сменившая его ранняя порция металлоносного флюида знаменуют начало дальнейшего чередующегося внедрения тех и других. Завершаются процессы внедрением поздних (послерудных) порций умеренно щелочных базальтовых расплавов с несколько повышенной лейкократовостью.



- Рис. 3. Ранний гранитоидный этап и начало позднего базальтоидного этапа становления антидромного флюидно-рудно-магматического комплекса на примере Кедровской зрелой ультраметаморфической (с гранодиоритовым массивом в ядре) очагово-купольной структуры. Кедровское месторождение. Пересечение сульфидно-кварцевой Пинегинской-I жилой и дорудной дайкой долерита дорудной дайки диоритового порфирита на периферии очагово-купольной структуры (план)
- **Fig. 3.** Early granitoid stage and the beginning of late basalt stage of antidromic fluid-ore-magmatic complex establishing by the example of Kedrovskaya mature ultrametamorphic (with granodioritic massif in the kernel) hearth-dome structure. Kedrovskoe deposit. Intersection of a pre-ore dyke of diorite-porphyrite by sulphidequartz Pineginskaya-I vein and pre-ore dolerite dyke at the periphery of the hearth-dome structure (plan)

Такого рода возрастные соотношения свойственны мезотермальным месторождениям золота, в том числе залегающим в гранитных массивах и толщах черных сланцев [29, 30, 49].

Между тем, минералого-химические составы послегранитных даек умеренно-щелочных долеритов ранней (дорудной) и последующих генераций отличаются постоянством и отвечают нормативному составу данного вида пород [7]. Это означает, что к моменту появления в области будущего рудообразования ранней порции металлоносных флюидов гранитных расплавов уже не существовало по причине полного завершения их кристаллизации. В противном случае внедрение базальтовых расплавов по унаследованным ими путям инъекции обусловливающих палингенез земной коры ранних высокотемпературных флюидов-теплоносителей – глубинным разломам – сопровождалось бы смешением их с остаточными гранитными расплавами и, как следствие, образованием даек пестрого состава. Последние во всех обсуждаемых перечисленных выше месторождениях не обнаружены.

Не менее дорудных информативны внутрирудные дайки умеренно щелочных долеритов, изученные в Берикульском (рис. 4), Зун-Холбинском, Кедровском, Уряхском, Сухоложском, Чертово Корыто месторождениях [12, 29, 30, 49]. Сохраняя черный цвет, они имеют «сваренные» с вмещающими породами контакты и после образования не подвергались дроблению, о чем свидетельствует отсутствие признаков перемещения противоположных стенок вмещающих дайки трещин отрыва в местах их коленообразных изгибов. Обладая на всю мощность (до 1,5 м) массивным сложением, дайки на 70...100 % объема преобразованы в метасоматиты среди в разной степени гидротермально измененных на этапе рудообразования или не измененных пород. По перечисленным признакам дайки квалифицированы как тепловые флюидопроводники, аккумулировавшие в горячем состоянии, согласно известному физическому явлению, потоки поднимавшихся горячих растворов, вместе с разломами разделяя последние на струи. В эпизодически сохранившихся в дайках незначительных по объему «останцах» сравнительно слабого изменения фиксируется нормативный отвечающий умеренно щелочному базальту минералого-химический состав слагающих дайки пород.

В числе метасоматических минералов выделяются высокотемпературные грязно-зеленый, зеленовато-розовый, красно-бурый биотит, зеленая обыкновенная роговая обманка и более низкотемпературные актинолит, тремолит, монтмориллонит, серпентин, хлорит, эпидот, серицит, кварц, карбонаты (кальцит, доломит, доломит-анкерит, анкерит, сидерит), альбит, лейкоксен, рутил, сфен, апатит, целестин, магнетит, пирит в разных количественных соотношениях в одной дайке и в разных дайках. Выделяются две генерации биотита. Ранняя, как и роговая обманка, замещается хлоритом в сочетании с эпидотом и другими минералами, чешуйки поздней обрамляют «венчиками» полностью замещенные тонкозернистыми агрегатами серицита, карбонатов, эпидота и других минералов кристаллы былого авгита.

Согласно петрохимическим пересчетам и балансовым расчетам внутридайковые метасоматиты образованы в результате фильтрации по горячим дайкам гидротермальных металлоносных растворов в условиях калиево-сернисто-углекислотного метасоматизма, оставивших в аподайковых метасоматитах разной контрастности, в том числе высококонтрастные, аномалии фемофильных элементов, - титана, фосфора, магния, железа, кальция, марганца и золота. Как отмечено выше, петрохимический профиль аподолеритового метасоматизма и упомянутые аномалии унаследованы околорудными березитами, в которых поступивший с растворами калий зафиксирован в более низкотемпературном, чем биотит, сериците, и отсутствует обыкновенная роговая обманка. Вместе с тем пульсационный режим функционирования гидротермальных рудообразующих систем подчер-



- Рис. 4. Поздний (базальтоидный) этап становления антидромного флюидно-рудно-магматического комплекса. Берикульское местрождение. Структурно-временные соотношения золотых руд с дорудными (две генерации, а), внутрирудными (б, в), послерудными (две генерации, г) дайками умеренно щелочных долеритов. Покровные базальтовые порфириты берикульской свиты (€₁) (1), дайки умеренно щелочных долеритов (2), березиты (3), золотоносные кварцевые жилы, прожилки, линзы (4), карбонатно-кварцевые прожилки (5), пирит (6), тектонические швы (7), зоны рассланцевания и дробления пород (8, 9)
- **Fig. 4.** Late (basalt) stage of establishing antidromic fluid-ore-magmatic complex. Berikulskoe deposit. Structural-temporal relations of gold ores with pre-ore (two generations, a), inter-ore ( $\delta$ , B), post-ore (two generations, r) dykes of moderate alkaline dolerites. Blanket basaltic porphyrites of berikulskaya suite ( $\epsilon_1$ ) (1), dykes of moderate alkaline dolerites (2), beresites (3), gold quartz veins, fibers, lenses (4), carbonate-quartz fibers (5), pyrite (6), tectonic sutures (7), zones of rock schistosity and fragmentation (8, 9)

кивается возрастанием температур поздних порций флюидов – кристаллизацией биотита поздней генерации после образования всех более низкотемпературных минералов аподайковых метасоматитов.

Итак, приведенные факты доказывают генерацию металлоносных флюидов в очагах умеренно щелочных базальтовых расплавов после завершения кристаллизации ранних гранитоидных и/или зрелых ультраметаморфических очагово-купольного типа магматических производных антидромных гранит-диорит-долеритовых флюидно-рудномагматических комплексов, которые повторяются во времени и пространстве, в силу этого отвечают формационному типу и специализированы на золото.

## Заключение

Мезотермальные месторождения золота Южной Сибири, образованные в кристаллическом и черносланцевом субстрате, служат, как это видно из приведенных материалов, источниками воспроизводимых эмпирических данных, которые не вписываются в существующие обоснования гипотетических и некоторых теоретических представлений о сущности гидротермального метасоматизма и рудообразования. Включение приведенных данных в научный оборот усиливает доказательную базу следующих положений, которые в равной степени распространяются на месторождения обеих противопоставляемых в течение пятидесяти лет и ныне совокупностей.

- Магматогенные гидротермальные рудообразующие системы функционируют в пульсационном (порционном) режиме.
- Металлоносные флюиды формируют в околорудном, рудовмещающем пространстве мезотермальных месторождений золота «черносланцевого» типа зональные метасоматические колонки пропилит-березитового профиля, аутентичные таковым в кристаллическом субстрате, с полиминеральными тыловой березитовой и осевой (рудоносной кварцевой жилой) зонами.
- 3. Титан, фосфор в сочетании с другими фемофильными элементами (Mg, Fe, Mn, Ca), определяющими петрохимическое своеобразие базитовых магм, в ближнем обрамлении рудоконтролирующих глубинных разломов подвижны и образуют в осевой и тыловых зонах околорудных, рудовмещающих метасоматических колонок контрастные аномалии, подчеркивающие (доказывающие) раствороподводящую функцию глубинных разломов и генерацию металлоносных флюидов в мантийных очагах умеренно щелочных базальтовых расплавов.
- Пространственная ассоциация и чередование во времени рудно-минеральных комплексов,

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Коржинский Д.С. Теория метасоматической зональности. М.: Наука, 1982. – 104 с.
- Таусон Л.В. Геохимические типы и потенциальная рудоносность гранитоидов. – М.: Наука, 1977. – 267 с.
- Буряк В.А. Метаморфизм и рудообразование. М.: Недра, 1982. – 256 с.
- Коржинский Д.С. Очерк метасоматических процессов // Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. – М.: Изд-во АН СССР, 1953. – С. 335–456.
- Смирнов С.С. О современном состоянии теории образования магматогенных рудных месторождений // Записки Всесоюзного минералогического общества. Вторая серия. – 1947. – Ч. 76. – Вып. 1. – С. 23–36.
- Кигай И.Н. Генезис гидротермальных месторождений цветных и редких металлов, связанных с гранитами: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – М., 1990. – 46 с.
- Петрографический кодекс. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования / под ред. О.А. Богатикова, О.В. Петрова, Л.Н. Шарпенка. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2008. – 200 с.
- Изучение процессов рудо- и минералообразования из высокотемпературных фумарольных газов на вулкане Кудрявый, о. Итуруп, Курильская дуга / С.И. Ткаченко, Р.П. Портер, М.А. Коржинский и др. // Геохимия. – 1999. – № 4. – С. 410–422.
- Бетехтин А.Г. Гидротермальные растворы, их природа и процессы рудообразования // Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. – М.: Изд-во АН СССР, 1953. – С. 286–334.
- Кучеренко И.В. Магматогенное золотое оруденение в структурах допалеозойской складчатости (на примере южного обрамления Сибирской платформы). Т. І. Руды, околорудные метасоматические и геохимические ореолы: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 1991. – 431 с.
- Вагина Е.А. Минеральные комплексы руд и генезис месторождения Чертово Корыто (Патомское нагорье): дис. ... канд. геол.минерал. наук. – Томск, 2012. – 141 с.

до-, внутри-, послерудных даек умеренно щелочных долеритов доказывают в сочетании с другими фактами функционирование флюидно-рудно-магматических систем в условиях высокой активности мантийных магматических резервуаров.

- 5. В приложении к мезотермальным месторождениям золота существует металлогеническая специализация магматизма, что доказывается образованием месторождений в составе повторяющихся во времени и пространстве антидромных гранит-диорит-долеритовых флюидно-рудно-магматических комплексов (формационных типов) на позднем базальтоидном этапе их эволюции.
- Гранитогенная, метаморфогенная, полигенная гипотезы, предложенные в прошлом в условиях дефицита эмпирических данных, представляют тупиковые направления в познании геологических процессов, инициирующих и обеспечивающих образование мезотермальных месторождений золота.

Автор выражает благодарность м-м Т.А. Сыресиной, подготовившей статью к печати.

- Кучеренко И.В. Петрология гидротермального метасоматизма долеритов внутрирудных даек мезотермальных месторождений золота. Ч. 2. Месторождение Зун-Холба (Восточный Саян) // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 1. – С. 73–86.
- Жариков В.А., Омельяненко Б.И. Классификация метасоматитов // Метасоматизм и рудообразование. – М.: Наука, 1978. – С. 9–28.
- Рафаилович М.С. Нетрадиционные месторождения золота Казахстана // Современные проблемы геологии и разведки полезных ископаемых: матер. Междунар. конф. Томск, 5–8 октября 2010. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. С. 368–373.
- 15. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе / В.Л. Русинов, О.В. Русинова, С.Г. Кряжев, Ю.В. Щегольков, Э.И. Альшева, С.Е. Борисовский // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50. – № 1. – С. 3–46.
- Золоторудные месторождения России / под ред. М.М. Константинова. – М.: Акварель, 2010. – 349 с.
- 17. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb-изотопного SHRIMP-датирования акцессорных минералов / М.А Юдовская, В.В. Дистлер, Н.В. Родионов, А.В. Мохов, А.В. Антонов, С.А. Сергеев // Геология рудных месторождений. – 2011. – Т. 53. – № 1. – С. 32–64.
- Вилор Н.В., Лепин В.С., Станевич А.М. Радиологическое и палеофитологическое датирование осадконакопления и преобразования пород Байкало-Патомского нагорья // Доклады АН СССР. – 1991. – Т. 318. – № 2. – С. 396–400.
- Кучеренко И.В. Гидродинамика трещинно-поровых флюиднопородных взаимодействий и механизм массопереноса в процессах околотрещинного гидротермального метасоматизма // Разведка и охрана недр. – 2010. – № 11. – С. 37–43.
- Бородаевский Н.И., Шер С.Д. Об околорудных изменениях в месторождениях золота // Труды ЦНИГРИ. – 1967. – Вып. 76.– С. 113–126.
- Жариков В.А. Некоторые закономерности метасоматических процессов // Метасоматические изменения боковых пород и их роль в рудообразовании. – М.: Недра, 1966. – С. 47–63.

- 22. Сахарова М.С., Ряховская С.К., Турчкова А.Г. Посткристаллизационные преобразования золото-кварцевых агрегатов в гидротермальных условиях (экспериментальные данные) // Геохимия. – 1999. – № 5. – С. 486–493.
- Кучеренко И.В. Об источниках кремнезема в образовании мезотермальных кварцево-жильных золотых месторождений // Региональная геология. Геология месторождений полезных ископаемых: матер. Междунар. науч.-техн. конф. – Томск 10–15 сентября 2001. – Томск: Изд-во ТПУ, 2001. – С. 249–255.
- 24. Кучеренко И.В., Прокофьев В.Ю. Минералого-петрохимическая зональность околорудного метасоматического ореола месторождения Зун-Оспа (Восточный Саян) // Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых Сибири: матер. науч. конф. / под ред. А.Ф. Коробейникова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2000. – С. 158–165.
- Маракушев А.А., Шаповалов Ю.Б. Экспериментальное исследование процесса рудной концентрации в гранитных системах // Доклады РАН. – 1993. – Т. 330. – № 4. – С. 526–530.
- Коржинский Д.С. Кислотно-основное взаимодействие в минералообразующих системах // Теория процессов минералообразования: избранные труды. – М.: Наука, 1994. – С. 6–19.
- 27. Намолов Е.А., Чиркова В.М. Типоморфные ассоциации и региональная минеральная зональность золото-кварцевых жил Бодайбинского рудного района // Геология и полезные ископаемые Восточной Сибири: Тез. докл. региональной науч. конф. – Иркутск: Иркутский гос. ун-т, 1986. – С. 62–63.
- Кучеренко И.В. О фосфор-магний-титановой специализации золотоносных березитов // Доклады АН СССР. – 1987. – Т. 293. – № 2. – С. 443–447.
- 29. Кучеренко И.В. Магматогенное золотое оруденение в структурах допалеозойской складчатости (на примере южного обрамления Сибирской платформы). Т. П. Геологические факторы и геолого-генетическая концепция рудообразования: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 1991. – 243 с.
- 30. Кучеренко И.В. Реконструкция золотопродуцирующей способности силикатных расплавов как основа петрологического и петрохимического прогнозно-поисковых критериев оценки территорий на золото // Золото и технологии. – 2013. – № 2 (20). – С. 70–80.
- 31. Экспериментальное исследование поведения золота в магматическом и гидротермальном процессах (к проблеме источников вещества золоторудных месторождений / Н.С. Жатнуев, А.Г. Миронов, Д.А. Дампилов, Н.Г. Бугаева // Золото Сибири: геология, геохимия, технология, экономика: тез. докладов I Сибирского симпозиума с междунар. участием. Красноярск, 1–3 декабря 1999. Красноярск: КГАЦМиЗ, 1999. С. 101–103.
- 32. Жмодик С.М., Миронов А.Г., Жмодик А.С. Золотоконцентрирующие системы офиолитовых поясов (на примере Саяно-Байкало-Муйского пояса). – Новосибирск: Академическое изд-во «ГЕО», 2008. – 304 с.
- 33. Геодинамические условия формирования золоторудных месторождений Бодайбинского неопротерозойского прогиба / М.И. Кузьмин, В.В. Ярмолюк, А.И. Спиридонов, В.К. Немеров, А.И. Иванов, Г.Л. Митрофанов // Доклады РАН. – 2006. – Т. 407. – № 6. – С. 793–797.
- 34. Goldberg I.S. The formation of ores as self-organizational process of redistribution of metals // The 31<sup>st</sup> International Geological Congress. – Rio de Janeiro, Aug. 6–17, 2000. – Rio de Janeiro: Geol. Surv. Brazil, 2000. – P. 3771.

- 35. Гончаров В.И., Воронин С.В., Тюкова Е.Э. Геохимия стабильных изотопов руд и вмещающих пород Наталкинского месторождения // Геологические этюды. – Магадан: СВ научный центр ДВО РАН, 2003. – С. 139–162.
- Metallogeny of gold deposits of China / Shao Jun, Hui Defeng, Kong Xiang-min, Shou Naiwu // Geology and Resources. – 2004. – V. 13. – № 4. – P. 246–250.
- 37. Немеров В.К., Митрофанов Г.Л., Семейкина Л.К. Флюидодинамическая (рудно-углеводородная) модель формирования большеобъемных платино-золоторудных месторождений сухоложского типа // Платина России. Новые нетрадиционные типы платиносодержащих месторождений. Результаты и направления работ по программе «Платина России». Т. VI. – М.: ООО «Геоинформмарк», 2005. – С. 61–68.
- Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena gold province, Russia / R. Large Ross, V.V. Maslennikov, R. Francois, L.V. Danyushevsky, Chang Zhaoshan // Economic Geology. - 2007. -V. 102. - № 7. - P. 1233-1267.
- 39. Галямов А.Л. Золотоносные осадочные комплексы складчатого обрамления Сибирской платформы // Руды и металлы. – 2010. – № 1. – С. 28–37.
- Lang J.R., Baker T. Intrusion-related gold systems: the present level of understanding // Mineral Deposita. - 2001. - V. 36. -P. 477-489.
- 41. Условия зарождения и эволюции гранитоидных золоторудномагматических систем в мезозоидах Северо-Востока Азии / Г.Н. Гамянин, Н.А. Горячев, А.Г. Бахарев, П.П. Колесниченко, А.И. Зайцев, Е.Н. Диман, Н.В. Бердников. – Магадан: СВ КНИИ ДВО РАН, 2003. – 196 с.
- Спиридонов А.М., Зорина Л.Д., Китаев Н.А. Золотоносные рудно-магматические системы Забайкалья. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2006. – 291 с.
- Yang X.M., Lentz D.R., Sylvester P.J. Gold contents of sulfide minerals in granitoids from Southwestern New Brunswick, Canada // Mineral Deposita. - 2006. - V. 41. - P. 369-386.
- 44. Hart C.J.R. Reduced Intrusion-Related Gold Systems // Economic Geology. 2006. V. 101. № 7. P. 1415–1427.
- 45. Золотоносные габрро-тоналит-гранодиорит-гранитные массивы Урала: возраст, геохимия, особенности магматической и рудной эволюции / Г.Б. Ферштатер, В.В. Холоднов, А.А. Кременецкий, А.А. Краснобаев, Н.С. Бородина, Е.А. Зинькова, С.В. Прибавкин // Геология рудных месторождений. – 2010. – Т. 32. – № 1. – С. 65–84.
- 46. Гусев А.И., Гусев А.А. Шошонитовые гранитоиды: петрология, геохимия, флюидный режим, рудоносность. – М.: Изд-во РАЕ, 2011. – 125 с.
- Гусев А. И. Петрология золотогенерирующего магматизма. М.: Изд-во РАЕ, 2012. – 160 с.
- 48. Коробейников А.Ф., Гусев А.И., Красова А.С. Восстановленные интрузивно-гидротермально-метасоматические золоторудные системы // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 16–22.
- 49. Kucherenko I.V., Zhang Yuxuan. Metallogenic problems of hydrothermal gold deposit formation: facts and arguments // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2015. V. 24. P. 1–8 (012024). URL: http://iopscience.iop.org/1755–1315/24/1/012024 (дата обращения 03.07.2015).

Поступила 06.07.2015 г.

#### UDC 553.2.065

## THEORIES, HYPOTHESES OF HYDROTHERMAL ROCK-ORE-FORMATION AND REALITY: FACTS AND ARGUMENTS

Igor V. Kucherenko,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: kucherenko.o@sibmail.com

**The relevance of the research** is caused by the necessity to introduce the clarity into hydrothermal rock-, ore-formation theories and hypotheses in which some natural facts are not joined.

**The main aim** of the study is to prove scientifically the theses excepting and/or supplementing deductions following from the theories and hypotheses, based on the well-known and new empiric data.

The methods used in the study: investigation of the gas-fluid inclusions in hydrothermal minerals homogenization, diagnostics and reconstruction of the succession of mineral complexes formation and minerals in its composition, petrologic-geochemical scientific research of the near-ore (ore-containing) metasomatic haloes and intradake apodolerite metasomatites formed in crystalline and blackshale substratum in hydrothermal gold deposits, investigation of the spatially-temporal and causally-investigatory correlations of the metasomatic rocks and ore-mineral complexes with regional metamorphism and magmatism derivatives in gold-ore regions, comparative analysis of metasomatic rocks and ore-formation in crystalline substratum and black-shale series.

**The results.** In perfection of the metasomatic processes theory it is necessary to take into account as real natural phenomena: 1) pulse regime of fissure-pore rock-fluid systems functioning, differently portional off and on entrance of hydrothermal, including metal-bearing, ore-forming solutions in the region of rock-ore-formation; 2) the stagnant regime not only, in accordance with the theory, of pore but also of fissure fluids in common hydraulic constrained fissure-pore rocs-fluid systems of metasomatic rock-ore formation; 3) contrary components diffusion, from fissure solutions into pore, and not only in reverse direction, which complicates mineral zoning of the near-fissure metasomatic haloes, stipulated by differential mobility of the components and, consequently, polymineral, but not monomineral, in accordance with theory, composition of their rear and adjacent zones; 4) mobility (migratory ability) of P, Ti, Al, considered in theory inert attached under any conditions, and accumulation of femophylic elements K, P, Ti, Mg, Fe, Ca, Mn association contrasting anomalies in near-ore (ore-containing) metasomatic haloes in the rear zones in ore-controlling and ore-bringing deep faults neighboring frame (down to 1,0..1,5 km).

Following facts: 1) accessory of near-ore altered rocks to peculiar in crystalline substratum combination of propilite and berisite metasomatic formations but not to derivatives of regional metamorphism of green slate facies; 2) subclark level of to-ore gold contents in black shales containing the unique (Sukhoi Log) and large (Verninskoe, Chertovo Koryto and other) deposits, – it is established by the author in many deposits by means of realization of petrologic-geochemic investigation technology; 3) geologic-material-genetic uniformity of the deposits formed in black shales terranes with magmatogenous deposits located in crystalline substratum, are not joined in metamorphogenetic hydrothermal hypothesis of gold deposit formation in black-shale series.

The paper introduces the investigation results, which prove, in contrast to other – granitogenous, metamorphogenous, polygenous, – the formation of mesothermal gold deposits in black shale and crystalline substratum in composition of antidromic specialized on gold fluid-ore-magmatic granite-diorite-dolerite complexes on the late basaltoid stage of their functioning.

## Key words:

The theory endogenous metasomatic processes, granitogenous, basaltogenous, metamorphogenous, polygenous hypotheses of gold deposit formation, facts, arguments, proofs.

The author expresses gratitude to mum T.A. Syresina for preparing the paper for publication.

## REFERENCES

- 1. Korzhinsky D.S. *Teoriya metasomaticheskoy zonalnosti* [The theory of metasomatic zoning]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 104 p.
- Tauson L.V. Geokhimicheskie tipy i potentsialnaya rudonosnost granitoidov [Geochemic types and potential ore content of granitoids]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 267 p.
- 3. Buryak V.A. *Metamorfizm i rudoobrazovanie* [Metamorphism and ore formation]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 256 p.
- Korzhinsky D.S. Ocherk metasomaticheskikh protsessov [Essay of metasomatic processes]. Osnovnye problemy v uchenii o magmatogennykh rudnykh mestorozhdeniyakh [Fundamental problems in studies about magmatogenous ore deposits]. Moscow, AC Publ, 1953. pp. 335–456.
- Smirnov S.S. O sovremennom sostoyanii teorii obrazovaniya magmatogennykh rudnykh mestorozhdeniy [On modern state of magmatogenous ore deposits formation theory]. Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshhestva. Vtoraya seriya, 1947, P. 76, Iss. 1, pp. 23–36.
- 6. Kigay I.N. Genezis gidrotermalnykh mestorozhdeny tsvetnykh i redkikh metallov, svyazannykh s granitami. Avtoreferat Dis.

*Dokt. nauk* [Genesis of hydrothermal deposits of colour and rare metals, constrained with granites. Dr. Diss. abstract]. Moscow, 1990, 46 p.

- Petrografichesky kodeks. Magmaticheskie, metamorficheskie, metasomaticheskie, impaktnye obrazovaniya [Petrographic code. Magmatic, metamorphic, metasomatic, impact formations]. Ed. by O.A. Bogatikov, O.V. Petrov, L.N. Sharpenok. St. Petersburg, VGI Publ., 2008. 200 p.
- Tkachenko S.I., Porter R.P., Korzhinsky M.A. Izuchenie protsessov rudo- i mineraloobrazovaniya iz vysokotemperaturnykh fumarolnykh gazov na vulkane Kudryavy, o. Iturup, Kurilskaya duga [Investigation of ore- and mineral-formation from hightemperature fumaroles gases on the Kudriavy volcano, island Iturup, Kurilskaya Bulge]. *Geochemistry*, 1999, no. 4, pp. 410–422.
- Betekhtin A.G. Gidrotermalnye rastvory, ikh priroda i protsessy rudoobrazovaniya [Hydrothermal solutions, their nature and oreformation]. Osnovnye problemy v uchenii o magmatogennykh rudnykh mestorozhdeniyakh.[Fundamental problems in studies on magmatogenous ore deposits]. Moscow, AS Publ., 1953, pp. 286-334.

- Kucherenko I.V. Magmatogennoe zolotoe orudenenie v strukturakh dopaleozoyskoy skladchatosti (na primere yuzhnogo obramleniya Sibirskoy platformy). T. I. Rudy, okolorudnye metasomaticheskie i geokhimicheskie oreoly. Dis. Dokt. nauk [Magmatogenous gold mineralization in structures of the precembrian folding (on example of Siberian craton south frame). Dr. Diss.]. Tomsk, 1991. 431 p.
- Vagina E.A. Mineralnye kompleksy rud i genezis mestorozhdeniya Chertovo Koryto (Patomskoe nagore). Dis. Kand. nauk [Mineral ore complexes and origin of the Chertovo Koryto deposit (Patom highland). Cand. Diss.]. Tomsk, 2012. 141 p.
- Kucherenko I.V. Petrologiya gidrotermalnogo metasomatizma doleritov vnutrirudnykh daek mezotermalnyh mestorozhdeny zolota. Ch. 2. Mestorozhdenie Zun-Holba (Vostochny Sayan) [Petrology of the dolerite hydrothermal metasomatism of the mesothermal gold deposits intraore dikes. P. 2. Zun-Kholba deposit (East Sajan)]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2015, vol. 326, no. 1, pp. 73–86.
- Zharikov V.A., Omelyanenko B.I. Klassifikatsiya metasomatitov [Classification of the metasomatites]. *Metasomatizm i rudoobrazovanie* [Metasomatism and ore formation]. Moscow, Nauka Publ., 1978. pp. 9–28.
- Rafailovich M.S. Netraditsionnye mestorozhdeniya zolota Kazakhstana [Nontraditional Kazakhstan gold deposits]. Sovremennye problemy geologii i razvedki poleznykh iskopaemykh: materialy Mezhdunarodnoy konferentsii [Proc. Int. conf. Modern problems of geology and prospecting of industrial minerals]. Tomsk, 5–8 October 2010. Tomsk, TPU Publ., 2010. pp. 368–373.
- Rusinov V.L., Rusinova O.V., Kryazhev S.G.. Okolorudny metasomatizm terrigennykh uglerodistykh porod v Lenskom zolotorudnom rayone [Near-ore metasomatism of the terrigenous carbonaceous rocks in Lensk gold-ore region]. *Geology of ore deposits*, 2008, vol. 50, no. 1, pp. 3–46.
- Zolotorudnye mestorozhdeniya Rossii [Gold ore deposits of Russia]. Ed. by M.M. Konstantinov. Moscow, Akvarel Publ., 2010. 349 p.
- 17. Yudovskaya M.A, Distler V.V., Rodionov N.V. Sootnoshenie protsessov metamorfizma i rudoobrazovaniya na zolotom chernoslantsevom mestorozhdenii Sukhoi Log po dannym U-Th-Pb-izotopnogo SHRIMP-datirovaniya aktsessornykh mineralov [Correlation of metamorphism and ore-formation in Sukhoi log gold black-shaly deposit according to U-Th-Pb-isotope SHRIMP-dating of accessory minerals]. *Geology of ore deposits*, 2011, vol. 53, no. 1, pp. 32–64.
- Vilor N.V., Lepin V.S., Stanevich A.M. Radiologicheskoe i paleofitologicheskoe datirovanie osadkonakopleniya i preobrazovaniya porod Baykalo-Patomskogo nagorya [Radiological and paleophytological dating of the sedimentation and rock alteration of Baikal-Patom highland]. *Doklady AN SSSR*, 1991, vol. 318, no. 2, pp. 396–400.
- 19. Kucherenko I.V. Gidrodinamika treshchinno-porovykh flyuidnoporodnykh vzaimodeystvy i mekhanizm massoperenosa v protsessakh okolotreshchinnogo gidrotermalnogo metasomatizma [Hydrodynamics of fracture-pore fluid-rock interactions and mechanism of masstransfer in near-fracture hydrothermal metasomatism processes]. *Razvedka i ohrana nedr*, 2010, no. 11, pp. 37–43.
- Borodaevsky N.I., Sher S.D. Ob okolorudnykh izmeneniyakh v mestorozhdeniyakh zolota [On near-ore alterations in gold deposits]. *Trudy CNIGRI*, 1967, Iss. 76, pp. 113–126.
- Zharikov V.A. Nekotorye zakonomernosti metasomaticheskikh protsessov [Some regularities of metasomatic processes]. Metasomaticheskie izmeneniya bokovykh porod i ikh rol v rudoobrazovanii [Metasomatic alteration of wall-rock and their role in ore-formation]. Moscow, Nedra Publ., 1966. pp. 47–63.
- 22. Sakharova M.S., Ryakhovskaya S.K., Turchkova A.G. Postkristallizatsionnye preobrazovaniya zoloto-kvartsevykh agregatov v gidrotermalnykh usloviyakh (eksperimentalnye dannye)

[Postcrystallizational alterations of gold-quartz aggregates in hydrothermal conditions (experimental data)]. *Geochemistry*, 1999, no. 5, pp. 486-493.

- 23. Kucherenko I.V. Ob istochnikakh kremnezema v obrazovanii mezotermalnykh kvartsevo-zhilnykh zolotykh mestorozhdeny [On silica sources in mesothermal quartz-vein gold deposits formation]. Regionalnaya geologiya. Geologiya mestorozhdeny poleznykh iskopaemykh: materialy Mezhdunarodnoy nauchnotekhnicheskoy konferentsii [Proc. Int. conf. Regional geology. Geology of the industrial minerals deposits]. Tomsk 10–15 September 2001. Tomsk, TPU Publ., 2001. pp. 249–255.
- 24. Kucherenko I.V., Prokofev V.Yu. Mineralogo-petrokhimicheskaya zonalnost okolorudnogo metasomaticheskogo oreola mestorozhdeniya Zun-Ospa (Vostochny Sayan) [Mineral-petrochemical zoning of near-ore metasomatic halo of Zun-Ospa deposit (East Sayan)]. Poiski i razvedka mestorozhdeny poleznykh iskopaemykh Sibiri: Materialy nauchnoy konferentsii [Proc. Sci. conf. Prospecting and exploration of the industrial minerals deposits of Siberial. Tomsk, TPU Publ., 2000. pp. 158-165.
- Marakushev A.A., Shapovalov Yu.B. Eksperimentalnoe issledovanie protsessa rudnoy kontsentratsii v granitnykh sistemakh [Experimental investigation of ore concentration in granite systems]. *Doklady RAN*, 1993, vol. 330, no. 4, pp. 526–530.
- Korzhinsky D.S. Kislotno-osnovnoe vzaimodeystvie v mineraloobrazuyushchikh sistemakh [Acid-basic interaction in mineralforming systems]. *Teoriya protsessov mineraloobrazovaniya: Izbrannye trudy* [The theory of mineral-forming processes: selected works]. Moscow, Nauka Publ., 1994. pp. 6–19.
- 27. Namolov E.A., Chirkova V.M. Tipomorfnye assotsiatsii i regionalnaya mineralnaya zonalnost zoloto-kvartsevykh zhil Bodaybinskogo rudnogo rayona [Typomorphic association and regional mineral zoning of gold-quartz veins of Bodaibo ore region]. Geologiya i poleznye iskopaemye Vostochnoy Sibiri: Tezisy dokladov regionalnoy nauchnoy konferentsii [Proc. reg. sci. conf. Geology and industrial minerals of East Siberia]. Irkutsk, ISI Publ., 1986. pp. 62–63.
- Kucherenko I.V. O fosfor-magny-titanovoy spetsializatsii zolotonosnykh berezitov [On phosphorus-magnezium-titanium spesialization of auriferous beresites]. Doklady AN SSSR, 1987, vol. 293, no. 2, pp. 443–447.
- Kucherenko I.V. Magmatogennoe zolotoe orudenenie v strukturakh dopaleozoyskoy skladchatosti (na primere yuzhnogo obramleniya Sibirskoy platformy). T. II. Geologicheskie faktory i geologo-geneticheskaya kontseptsiya rudoobrazovaniya. Dis. Dokt. nauk [Magmatogenous gold mineralization in structures of the precembrian folding on example of Sibirion craton frame. Vol. 2. Geologic factors and ore-formation geologic-genetic conception. Dr. Diss]. Tomsk, 1991. 243 p.
- 30. Kucherenko I.V. Rekonstruktsiya zolotoprodutsiruyushchey sposobnosti silikatnykh rasplavov kak osnova petrologicheskogo i petrokhimicheskogo prognozno-poiskovykh kriteriev otsenki territory na zoloto [Reconstruction of goldeducing faculty of silicate melts as base of petrological and petrochemical forecasting and prospecting criterions of territories appraisal for gold]. Zoloto i tehnologii, 2013, no. 2 (20), pp. 70–80.
- 31. Zhatnuev N.S., Mironov A.G., Dampilov D.A. Eksperimentalnoe issledovanie povedeniya zolota v magmaticheskom i gidrotermalnom protsessakh (k probleme istochnikov veshchestva zolotorudnykh mestorozhdeny [Experimental investigation of gold behavior in magmatic and hydrothermal processes (for problem of matter gold-ore deposits sources]. Zoloto Sibiri: geologiya, geokhimiya, tekhnologiya, ekonomika: Tezisy dokladov I Sibirskogo simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiem [Proc. I Siberian symposium. Gold of Siberia: geology, geochemistry, technology, economics]. Krasnojarsk, 1–3 december 1999. Krasnoyarsk, KGA-CMiZ, 1999. pp. 101–103.
- 32. Zhmodik S.M., Mironov A.G., Zhmodik A.S. Zolotokontsentriruyushchie sistemy ofiolitovykh poyasov (na primere Sayano-Bayka-

*lo-Muyskogo poyasa*) [Gold concentration systems of the ophiolitic belts (on example of Sayan-Baikal-Muisk belt]. Novosibirsk, GEO Publ., 2008. 304 p.

- 33. Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Spiridonov A.I. Geodinamicheskie usloviya formirovaniya zolotorudnykh mestorozhdeniy Bodaybinskogo neoproterozoyskogo progiba [Geodynamical conditions of gold deposits formation of Bodaibo Neoproterozoic depression]. Doklady RAN, 2006, vol. 407, no. 6, pp. 793–797.
- 34. Goldberg I.S. The formation of ores as self-organizational process of redistribution of metals. *The 31-st International Geological Congress.* Rio de Janeiro, Aug. 6–17, 2000. Rio de Janeiro: Geol. Surv. Brazil, 2000. pp. 3771.
- 35. Goncharov V.I., Voronin S.V., Tyukova E.E. Geokhimiya stabilnykh izotopov rud i vmeshchayushchikh porod Natalkinskogo mestorozhdeniya [Geochemistry of the stable isotopes of Natalkinskoe deposit ores and containing rocks]. *Geologicheskie ety*udy. Magadan, SV nauchny centr DVO RAN, 2003. pp. 139–162.
- 36. Shao Jun, Hui Defeng, Kong Xiang-min, Shou Naiwu. Metallogeny of gold deposits of China. *Geology and Resources*, 2004, vol. 13, no. 4, pp. 246-250.
- 37. Nemerov V.K., Mitrofanov G.L., Semeykina L.K. Flyuidodinamicheskaya (rudno-uglevodorodnaya) model formirovaniya bolsheobemnykh platino-zolotorudnykh mestorozhdeny sukholozhskogo tipa [Fluiddynamical (ore-hydrocarbonaceous) model of greater-volume platinum-goldore deposits Sukhoi Log type formation]. Platina Rossii. Novye netraditsionnye tipy platinosoderzhashchikh mestorozhdeny. Rezultaty i napravleniya rabot po programme «Platina Rossii» [Platinum of Russia. New non-traditional types of the platinum-containing deposits. Results and works directions on Program «Platinum of Russia]. Moscow, Geoinformmark Publ., 2005. T. VI, pp. 61–68.
- Large Ross R., Maslennikov V.V., Francois R., Danyushevsky L.V., Chang Zhaoshan. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena gold province, Russia. *Economic Geology*, 2007, vol. 102, no. 7, pp. 1233-1267.
- Galyamov A.L. Zolotonosnye osadochnye kompleksy skladchatogo obramleniya Sibirskoy platformy [Auriferous sedimentary complexes of the Siberian craton folded framework]. *Rudy i metally*, 2010, no. 1, pp. 28–37.
- Lang J.R., Baker T. Intrusion-related gold systems: the present level of understanding. *Mineral Deposita*, 2001, vol. 36, pp. 477-489.

- 41. Gamyanin G.N., Goryachev N.A., Bakharev A.G. Usloviya zarozhdeniya i evolyutsii granitoidnykh zolotorudno-magmaticheskikh sistem v mezozoidakh Severo-Vostoka Azii [Conditions of the conception and evolution of granitoid gold-ore-magmatic systems in mesozoides of North-East Asia]. Magadan, SV KNII DVO RAN, 2003. 196 p.
- Spiridonov A.M., Zorina L.D., Kitaev N.A. Zolotonosnye rudnomagmaticheskie sistemy Zabaykalya [Auriferous ore-magmatic systems of Trans-Baikal]. Novosibirsk, Geo Publ., 2006. 291 p.
- Yang X.M., Lentz D.R., Sylvester P.J. Gold contents of sulfide minerals in granitoids from Southwestern New Brunswick, Canada. *Mineral Deposita*, 2006, vol. 41, pp. 369–386.
- Hart C.J.R. Reduced Intrusion-Related Gold Systems. *Economic Geology*, 2006, vol. 101, no. 7, pp. 1415–1427.
- 45. Fershtater G.B., Kholodnov V.V., Kremenetsky A.A. Zolotonosnye gabrro-tonalit-granodiorit-granitnye massivy Urala: vozrast, geokhimiya, osobennosti magmaticheskoy i rudnoy evolyutsii [Auriferous gabbro-tonalite-granodiorite-granite massifes of Ural: age, geochemistry, features of magmatic and ore evolution]. Geology of ore deposits, 2010, vol. 32, no. 1, pp. 65–84.
- 46. Gusev A.I., Gusev A.A. Shoshonitovye granitoidy: petrologiya, geokhimiya, flyuidny rezhim, rudonosnost [Shoshonitic granitoids: petrology, geochemistry, fluid regime, ore-content]. Moscow, RAE Publ., 2011. 125 p.
- 47. Gusev A.I. Petrologiya zolotogeneriruyushchego magmatizma [Petrology of the gold-generating magmatism]. Moscow, RAE Publ., 2012. 160 p.
- Korobeynikov A.F., Gusev A.I., Krasova A.S. Vosstanovlennye intruzivno-gidrotermalno-metasomaticheskie zolotorudnye sistemy [Reduced intrusive-hydrothermal-metasomatic gold-ore systems]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 16-22.
- Kucherenko I.V., Zhang Yuxuan. Metallogenic problems of hydrothermal gold deposit formation: facts and arguments. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2015. Vol. 24, pp. 1-8 (012024). Available at: http://iopscience.iop.org/ 1755-1315/24/1/012024 (accessed 03 July 2015).

Received: 06 July 2015.

УДК 621.3.077.2:621.3.077.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ТРАНСМИССИИ С ПЕРЕМЕННЫМ ПЕРЕДАТОЧНЫМ ОТНОШЕНИЕМ В ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ В ЦЕЛЯХ ПОВЫШЕНИЯ ЗАПАСА ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

## Удалов Сергей Николаевич,

канд. техн. наук, доцент каф. систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: oudalovsn@yandex.ru

## Приступ Александр Георгиевич,

канд. техн. наук, доцент каф. электромеханики Новосибирского государственного технического университета. Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: a pristup@mail.ru

## Ачитаев Андрей Александрович,

аспирант каф. систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета. Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: ac-an-alec@mail.ru

Актуальность работы обусловлена тем, что в России более 2/3 территорий не имеет централизованного электроснабжения. Существуют небольшие изолированные энергетические системы, состоящие из нескольких нагрузок, мощностью от 1 до 15 МВт. К сожалению, доля мирового производства малых электростанций небольшой мощности ограничивается 25 %. Другая доля приходится на крупные газотурбинные генераторы, мощностью свыше 20 МВт. Одной из причин ограниченного применения установок малой мощности является их малый запас динамической устойчивости вследствие их малой инерции. Отметим, что нарушение динамической устойчивости возникает при резких изменениях в режиме нагрузки или при коротких замыканиях. Однофазные замыкания наблюдаются в 70 % случаев от общего числа возмущений, которые могут вызвать отключения части нагрузки или электрических генераторов в системе. Это может привести к асинхронному режиму оставшихся генераторов. В данной работе представлен способ поддержания синхронной скорости вращения генератора с помощью электромеханического комтолеска на базе магнитной трансмиссии с переменным передаточным отношением в составе с ветроэнергетической установкой модиности.

**Цель работы:** повышение запаса динамической устойчивости энергетических систем с распределенной генерацией, имеющих в своем составе несколько электрических генераторов малой мощности.

**Методы исследования:** использование метода конечных элементов для анализа геометрии магнитной трансмиссии с переменным передаточным отношением на базе Максвелл 2D; разработка математической модели на базе уравнений магнитных полей для определения вращающего момента и её зависимости от угловой координаты ротора.

**Результаты.** Получена математическая модель магнитной трансмиссии, из которой следует вывод о взаимосвязи геометрических параметров и величины максимального электромагнитного момента. Была установлена линейная связь между передаточным отношением и скоростью ротора управления. Рассмотрен анализ соотношения чисел пар полюсов в конструкции роторов магнитной трансмиссии и их взаимосвязи между моментами на тихоходном и быстроходном валах. Определена зависимость вращающего момента от углового положения ротора быстроходного звена. Проведен анализ магнитных полей магнитной трансмиссии с целью определения величины потерь в ферромагнитных элементах конструкции.

#### Ключевые слова:

Ветровая турбина, магнитная трансмиссия, динамическая устойчивость, синхронная машина, математическая модель.

## Введение

Сегодня развитие распределенной энергетики в России невозможно без средств, позволяющих повысить регулировочные качества генерирующих устройств. Это связано с тем, что в настоящее время в России распределённая энергетика актуальна в изолированных энергосистемах небольшой мощности. К сожалению, в таких энергосистемах существуют недостатки в виде проблем с электроснабжением, связанные с потерей запаса динамической устойчивости, которые возникают при коротких замыканиях или резких изменениях режима нагрузки.

Параллельная работа генераторов электрических станций, входящих в энергосистему, отличается от работы генераторов на одной станции наличием линий электропередачи, связывающих эти станции. Сопротивления линий электропередачи уменьшают синхронизирующую мощность генераторов и затрудняют их параллельную работу. Кроме того, отклонения от нормального режима работы системы, которые происходят при отключениях, коротких замыканиях, внезапном сбросе или увеличении нагрузки, также могут привести к нарушению устойчивости, что является одной из наиболее тяжелых аварий, приводящей к перерыву электроснабжения потребителей. Поэтому изучение проблемы устойчивости очень актуально.

## Постановка проблемы

В изолированной автономной электроэнергетической системе, состоящей из нескольких источников электрической энергии, однофазное замыкание наблюдается в 70 % случаев от общего числа возмущений, которые являются аварийными. Дальнейшие действия связаны с последующим отключением поврежденного генератора или части нагрузки. При этом нарушается баланс выработки и потребления энергии, при котором остальные генераторы не позволяют обеспечить необходимую мощность и частота энергосистемы падает. Также при отключении части нагрузки наблюдается переизбыток активной мощности, что способствует ускорению генераторов. В условиях автономной энергосистемы данный вид нарушений может привести к асинхронному режиму оставшихся в работе синхронных генераторов, которые связаны между собой линиями с разными сопротивлениями. Это приводит к появлению рассогласованности угла нагрузки между ЭДС энергосистемы и ЭДС генераторов.

На данный момент в России имеются серии работ, посвященных проблеме повышения запаса динамической устойчивости синхронных электрических генераторов при условиях работы в изолированных энергетических системах [1–11]. Б.Н. Абрамович [8, 9] предлагает метод поддержания запаса динамической устойчивости, с использованием оценки допустимого уменьшения напряжения. А.С. Яндульский предлагает оценивать динамические характеристики многомашинных электроэнергетических систем на основе данных системы мониторинга переходных режимов [10]. К сожалению, данные подходы не позволяют оценить ситуацию при развитии автономной энергосистемы в перспективе без внедрения дорогостоящих резервов активной мощности. А.Н. Беляев рассматривает применение электромагнитного тормоза для увеличения запаса динамической устойчивости автономной энергосистемы [11]. Однако высокая постоянная времени (от 1 до 5 с) не позволяет обеспечить достаточного быстродействия турбины, так как время изменения угла нагрузки в случае внешних или внутренних возмущений между ЭДС генератора и энергетической системы может составлять десятые доли секунды. За этот период происходит рассогласование угла нагрузки между ЭДС системы и генератора.

Объектом исследования в статье является ветроэнергетическая установка. Ветроэнергетика является технологией, которая обеспечивает потребителей экологически чистой энергией и позволяет формировать уникальные исследовательские задачи. Каждый год в мире устанавливаются и подключаются к энергосистемам большие ветровые турбины [12]. Ветровые турбины не только становятся все более распространенными, но также увеличиваются их габаритные размеры и единичная мощность. Эффект масштаба, который связан с энергией ветра толкает производителей с каждым годом выпускать большие турбины. Улучшения в технологии производства ветровых турбин позволили генераторам масштабироваться до величины, превышающей 10 МВт [13]. В качестве электрических генераторов для таких ветроэнергетических установок можно использовать только синхронные генераторы [14]. Но при подключении к энергосистеме, состоящей из нескольких генераторов, проблемой является потеря запаса динамической устойчивости системы электроснабжения, которое возникает при резких изменениях режима нагрузки или при коротких замыканиях на генераторах или в составе нагрузки [15].

Современная ветроэнергетическая установка состоит из трех основных компонентов (рис. 1, 2): ветровой турбины, генератора и планетарной трансмиссии [16].



- **Рис. 1.** Компоновка современной ветроэнергетической установки NORDEX: 1 турбина; 2 трансмиссия; 3 генератор
- *Fig. 1.* Arrangement of a modern wind-driven generator NORDEX: 1 is the turbine; 2 is the transmission; 3 is the generator



- **Рис. 2.** Электромеханическая компоновка: 1 планетарная трансмиссия; 2 генератор
- *Fig. 2.* Electromechanical arrangement: 1 is the planetary transmission; 2 is the generator

К недостаткам статической планетарной трансмиссии можно отнести постоянный передаточный коэффициент, не позволяющий управлять скоростью генератора, высокие эксплуатационные издержки, акустический шум, трение [17].

## Предлагаемое решение

Данная работа предлагает решение, которое состоит в использовании технологии псевдо-прямого привода [16-25]. Суть разработки заключается в замещении планетарной механической трансмиссии магнитным редуктором с переменным передаточным отношением. Рис. 4 и 5 показывают схематично предложенную магнитную трансмиссию с переменным передаточным отношением. Магнитная трансмиссия является устройством для преобразования момента между двух вращающихся частей с различным числом постоянных магнитов через модулирующие ферромагнитные сегменты на тихоходном валу. Они позволяют менять скорость вращения тихоходного вала в зависимости от заданного числа пар полюсов ферромагнитных сегментов.

Переменное передаточное отношение осуществляется путем действия обмотки управления (рис. 3), которая обеспечивает изменение скорости вращения ротора управления передаточным отношением и, влияя на скорость тихоходного и быстроходного валов, изменяет скорость на генераторе. Обращаем внимание, что в схеме отсутствует инвертор в силовой части цепи (рис. 3). Для реализации управления применяются два инвертора, рассчитанные на значительно меньшую мощность, чем инвертор между генератором и системой. Они обеспечивают преобразование частоты для заряда аккумуляторных батарей и питания обмотки управления.



**Рис. 3.** Компоновка ветроэнергетической установки на базе магнитной трансмиссии и синхронного генератора



Сравнивая магнитную трансмиссию и механическую планетарную можно выделить для магнитной трансмиссии высокую плотность выходного момента, которая может превышать 100 кН·м/м<sup>3</sup> благодаря использованию постоянных магнитов из редкоземельных металлов [16, 18]. Также, по причине отсутствия механического контакта между вращающимися частями, у магнитной трансмиссии высокий КПД [19, 20]. Идея магнитной трансмиссии возникла еще в начале 20 в. Примером может служить патент США в 1913 г., описывающий электромагнитную передачу, состоящую из двух вращающихся валов со стальными явновыраженными полюсами [21]. Два вала соединены через взаимодействие постоянных магнитов с разным числом полюсов. Такая топология предусматривает практически полное отсутствие шума и высокий КПД. К сожалению тогда она не нашла коммерческого применения, и идея была забыта [22].

Данная статья посвящена исследованию магнитной трансмиссии с целью ее использования в ветроэнергетической установке. Геометрия магнитной трансмиссии представлена на рис. 5. Геометрические параметры магнитной трансмиссии представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры предлагаемой магнитной трансмиссииTable 1.Parameters of the proposed magnetic transmission

Параметр/Parameter	Значение/Value		
Осевая длина/Axial length	800		
Радиус статора звена управления Control link stator radius	830		
Внутренний радиус статора звена управления nner radius of control link stator	631		
Внешний радиус ротора управления Outer radius of control rotor	600	mm	
Высота постоянных магнитов Permanent magnet height	60		
Внешний диаметр быстроходного звена Outer diameter of a high-speed element	384		
Номинальная скорость быстроходного звена Nominal speed of a high-speed element	750	0 об/мин rev/min	
Номинальная скорость тихоходного звена Nominal speed of a low-speed element	170		





**Fig. 4.** Draft of magnetic transmission with variable gear ratio: 1 is the control winding; 2 is the non-magnetic insert; 3 is the modulate ring of ferromagnetic sections; 4 is the low-speed element; 5 is the control rotor with permanent magnets; 6 is the high-speed element



**Рис. 5.** Основная компоновка геометрии машины: 1 – ротор управления; 2 – быстроходное звено; 3 – модулирующее кольцо

Fig. 5. The main arrangement of the device geometry: 1 is the control rotor; 2 is the high-speed element; 3 is the modulate ring

#### Математическое описание магнитной трансмиссии

Ферромагнитные сегменты тихоходного звена модулируют магнитное поле в воздушном зазоре между внутренним быстроходным ротором с постоянными магнитами и внешним ротором управления с постоянными магнитами. При отсутствии управления величина передаточного отношения равна отношению числа пар полюсов ротора управления к числу пар полюсов внутреннего быстроходного ротора [23, 24].

Обозначим:  $p_1$  — число пар полюсов обмотки управления наружной системы магнитов управляемого ротора;  $p_2$  — число пар полюсов внутренней системы магнитов управляемого ротора;  $p_k$  — число ферромагнитных полюсов модулирующего кольца, являющегося тихоходным звеном трансмиссии;  $p_3$  — число пар полюсов быстроходного ротора.

Магнитодвижущая сила внутренней магнитной системы внешнего ротора управления, которая выражается уравнением (1) вращается со скоростью  $\omega_2$  и содержит постоянные магниты с числом пар полюсов  $p_3$ :

$$F_{2} = F_{2m} \cos(p_{2}\theta - p_{2}\omega_{2}t + p_{2}\phi_{2}), \qquad (1)$$

где  $F_{2m}$  – амплитуда основной гармоники магнитодвижущей силы;  $\theta$  – угловая координата;  $\varphi_2$  – начальное угловое положение (рис. 5).

С другой стороны, создаваемая магнитодвижущая сила, вращающаяся со скоростью  $\omega_3$  и имеющая число пар полюсов  $p_3$  на быстроходном роторе [23]:

$$F_3 = F_{3m} \cos(p_3 \theta - p_3 \omega_3 t + p_3 \varphi_3),$$

где  $F_{3m}$  – амплитуда основной гармоники магнитодвижущей силы;  $\varphi_3$  – начальное угловое положение.

Ограничиваясь постоянной составляющей и основной гармоникой, можно записать магнитную

проводимость вращающегося модулирующего кольца с числом пар полюсов  $p_k$  как:

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_{1m} \cos(p_k \theta - p_k \omega_k t + p_k \varphi_k),$$

где  $\lambda_0$  и  $\lambda_{1m}$  – постоянная составляющая и амплитуда первой гармоники магнитной проводимости  $\lambda$ соответственно,  $\varphi_k$  – начальное угловое положение.

Магнитная индукция, создаваемая  $F_2$ :

$$B_2 = \lambda F_2 = B_{21} + B_{22} + B_{23},$$

где

$$B_{21} = \lambda_0 F_{2m} \cos(p_2 \theta - p_2 \omega_2 t + p_2 \phi_2),$$
 (2)

$$B_{22} = \frac{1}{2}\lambda_{1m}F_{2m} \times$$

$$\times \cos[(p_k - p_2)\theta + p_2\omega_2 t - p_k\omega_k t + p_k\varphi_k - p_2\varphi_2],$$

$$B_{23} = \frac{1}{2} \lambda_{1m} F_{2m} \times$$

 $\times \cos[(p_k + p_2)\theta - p_2\omega_2 t - p_k\omega_k t + p_k\varphi_k + p_2\varphi_2].$ (3)

Магнитная индукция, создаваемая магнитодвижущей силой  $F_3$ :

$$B_3 = \lambda F_3 = B_{31} + B_{32} + B_{33},$$

где

$$B_{31} = \lambda_0 F_{3m} \cos(p_3 \theta - p_3 \omega_3 t + p_3 \varphi_3),$$
(4)

$$B_{32} = \frac{1}{2} \lambda_{1m} F_{3m} \times$$

 $\times \cos[(p_k - p_3)\theta + p_k\omega_k t + p_3\omega_3 t + p_k\varphi_k - p_3\varphi_3],$ 

$$B_{33} = \frac{1}{2} \lambda_{1m} F_{3m} \times$$

$$\times \cos[(p_k + p_3)\theta - p_k\omega_k t - p_3\omega_3 t + p_k\varphi_k + p_3\varphi_3].$$
 (5)

Для магнитного редуктора, работающего на принципе модуляции кривой индукции в воздушном зазоре должны выполняться следующее соотношение [23]:

$$p_2 + p_3 = p_k, \tag{6}$$

Из выражений (2) и (5) с учетом (6) следует, что компонента В<sub>21</sub> магнитного поля, производимая внешним ротором управления, и компонента  $B_{32}$  магнитного поля, производимая внутренним быстроходным ротором, будет иметь совпадающее число пар полюсов, равное  $p_2$ , и будет вращаться с одинаковой угловой частотой. Аналогично из уравнений (3) и (4) следует, что компонента  $B_{22}$  магнитного поля, производимая внешним ротором управления, и компонента  $B_{31}$  магнитного поля, производимая внутренним ротором, также будут иметь совпадающее число пар полюсов  $p_3$  и будут вращаться с одинаковой угловой скоростью. Таким образом, указанные компоненты магнитного поля будут создавать постоянный электромагнитный момент между двумя роторами.

Магниты на внутренней поверхности звена управления передаточным отношением могут быть представлены как токовый слой, распределенный по поверхности:

$$J_{2} = \frac{dF_{2}}{d\theta} = -p_{2}F_{2m}\sin(p_{2}\theta - p_{2}\omega_{2}t + p_{2}\phi_{2}).$$
 (7)

Вращающий момент внешнего ротора управления является результатом взаимодействия магнитного потока постоянных магнитов на входном роторе и эквивалентного поверхностного тока на внешнем роторе управления и может быть записан следующим выражением:

$$M_{2} = \int_{0}^{2\pi} [J_{2} \times B_{32}] J_{a} R d\theta, \qquad (8)$$

где R – радиус;  $l_a$  – длина магнитной трансмиссии. После подстановки (7) и (5) в (8) и интегрирования получаем:

$$M_{2} = -p_{2}M_{m}\sin(p_{k}\varphi_{k} - p_{2}\varphi_{2} - p_{3}\varphi_{3}),$$

где  $p_2$  – число пар полюсов внешнего ротора управления;  $p_k$  – число ферромагнитных сегментов на тихоходном звене;  $p_3$  – число пар полюсов быстроходного ротора;  $M_m$  – амплитудное значение момента, которое выражается соотношением:

$$M_{m} = \frac{\pi}{2} \lambda_{1m} F_{2m} F_{3m} l_a R l_a$$

 $M_{\rm m}$  зависит от геометрических параметров трех роторов трансмиссии и свойств магнитов и ферромагнитных материалов.

Аналогичным образом получается соотношения для момента, действующего на быстроходный ротор с числом пар полюсов  $p_3$ :

$$M_{3} = -p_{3}M_{m}\sin(p_{k}\varphi_{k} - p_{2}\varphi_{2} - p_{3}\varphi_{3}).$$

В установившемся состоянии угол нагрузки  $\varphi_e = p_2 \varphi_2 - p_k \varphi_k + p_3 \varphi_3$  должен быть постоянным, следовательно:

$$\frac{d(p_k \varphi_k - p_2 \varphi_2 - p_3 \varphi_3)}{dt} = 0$$
  
или  $(p_k \omega_k - p_2 \omega_2 - p_3 \omega_3) = 0,$ 

где  $\omega_2$ ,  $\omega_k$ ,  $\omega_3$  — механические угловые скорости звена управления, тихоходного и быстроходного валов соответственно.

Передаточное отношение между входным и выходным валами получается:

$$G(\omega_2) = \frac{\omega_k}{\omega_3} = \frac{p_3}{p_k} + \frac{p_2}{p_k} \frac{\omega_2}{\omega_3}.$$
 (9)

Таким образом, управляя скоростью внешнего ротора (ротора управления)  $\omega_2$  по отношению к входной скорости ротора  $\omega_3$ , передаточное отношение между входным и выходным ротором может регулироваться. Моменты  $M_2$ ,  $M_k$  и  $M_3$ , действующие на роторы соответственно, могут быть получены при условии пренебрежения потерями. Тогда можно записать:

$$M_{2} + M_{k} + M_{3} = 0;$$
  

$$\omega_{2}M_{2} + \omega_{k}M_{k} + \omega_{3}M_{3} = 0.$$
 (10)

На основании этого получается момент на быстроходном валу:

$$M_k = p_k M_m \sin(p_k \varphi_k - p_2 \varphi_2 - p_3 \varphi_3).$$

Если прикладывать внешний момент к ротору управления  $M_{_{\rm ymp}}$ , к быстроходному  $M_{_{\rm быстр}}$  и тихоходному валу  $M_{_{\rm тих}}$  соответственно, система уравнений динамики электромеханического преобразователя будет иметь вид:

$$\begin{cases} J_{y \eta p} \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} = \\ = M_{y \eta p} - p_2 M_m \sin(p_k \varphi_k - p_2 \varphi_2 - p_3 \varphi_3) \\ J_{6 \text{bacrp}} \frac{d^2 \varphi_3}{dt^2} = \\ = M_{6 \text{bacrp}} - p_3 M_m \sin(p_k \varphi_k - p_2 \varphi_2 - p_3 \varphi_3) \\ J_{\tau \mu x} \frac{d^2 \varphi_k}{dt^2} = \\ = M_{\tau \mu x} + p_k T_{\text{max}} \sin(p_k \varphi_k - p_2 \varphi_2 - p_3 \varphi_3), \end{cases}$$
(11)

где  $J_{\text{тих}}$ ,  $J_{\text{быстр}}$ ,  $J_{\text{упр}}$  – момент инерции тихоходного, быстроходного звена и внешнего ротора управления соответственно. Примем в качестве допущения в уравнениях (11) отсутствие потерь в магнитной системе и потерь на трение.

## Полевые исследования магнитной трансмиссии методом конечных элементов

В целях определения параметров режима работы магнитной трансмиссии применен метод конечных элементов. С помощью программного комплекса Maxwell рассчитана характеристика вращающего момента от угла положения быстроходного звена в 2D постановке. На рис. 6 представлены результаты расчета угловой характеристики и отображен регулировочный диапазон области возможного изменения передаточного отношения трансмиссии. Была проведена серия расчетов по изменению положения ротора быстроходного звена. Рис. 7 демонстрирует распределение магнитной индукции при фиксированном положении ротора управления. На рис. 8 показано распределение магнитной индукции при вращении ротора управления и быстроходного звена.

На основании уравнения (9) следует линейный закон изменения передаточного отношения в зависимости от скорости вращения ротора управления [25]. Рис. 9 отображает изменение передаточного отношения как функцию от скорости ротора управления при скорости быстроходного вала, равной 750 об/мин. Как видно, передаточное отношение становится меньшим, когда скорость ротора управления уменьшается и, наоборот, становится больше при увеличении скорости ротора управления [22, 23]. Когда передаточное отношение равно 1, все три ротора вращаются с некоторой скоростью и действующая входная механическая мощность равна нулю. Когда передаточное отношение не равно 1, обмотка управления будет питать аккумулятор или наоборот потреблять энергию из аккумулятора. Все зависит от передаточного отношения,



Fig. 6. Power-angle curve of magnetic transmission

которое может быть большим или меньшим чем 1 и направления передачи мощности между входным и выходным роторами. Следует отметить, что единичное передаточное отношение соответствует нормальному статическому режиму трансформации скорости тихоходного и быстроходного валов. Рис. 10 изображает расчет вращающего момента при условии вращения тихоходного вала и быстроходного вала с их номинальными скоростями. По величине знаков следует, что направление вращения происходит в разные стороны, что подтверждается уравнением (10).



**Рис. 7.** Распределение магнитного поля в якоре электромеханического комплекса при фиксированном положении внешнего ротора управления

Fig. 7. Magnetic field distribution in the armature of electromechanical complex at fixed setting of outer control rotor



- **Рис. 8.** Распределение магнитного поля при условии вращения с номинальной скоростью внешнего ротора управления и быстроходного вала
- Fig. 8. Magnetic field distribution at rotation of outer control rotor and high speed shaft with nominal speed

## Расчет потерь в стали

Потери в ферримагнитных ярмах роторов и элементах модулирующего кольца являются важным критерием эффективности трансмиссии. Примененный метод конечных элементов позволяет рассчитать потери в стали. После получения кривых изменения магнитной индукции для каждого конечного элемента производится разложение в ряд Фурье. Затем потери интегрируются, а именно потери на вихревые токи  $P_e$  (12) и потери на гистерезис  $P_h$  (13), поэтому могут быть выражены как [17]:



Fig. 9. Dependence of gear ratio on rotation rate of the outer control rotor



**Рис. 10.** Результаты расчета вращающего момента магнитной трансмиссии при условии вращения внешнего ротора управления с номинальной скоростью

Fig. 10. Results of calculation of the magnetic transmission torque at the outer control rotor rotation at nominal speed

$$P_{e} = \oint \sum_{n} \rho K_{e} (nf)^{2} (B_{nr}^{2} + B_{nt}^{2}) dV, \qquad (12)$$

$$P_{h} = \oint \sum_{n} \rho K_{h}(nf) (B_{nr}^{2} + B_{nt}^{2}) dV, \qquad (13)$$

где  $\rho$  – плотность металла сердечника; n означает порядок гармоники; f – частота перемагничивания; V – объем якоря сердечника;  $B_{nr}$  и  $B_{nt}$  – радиальная и тангенциальная компонента n-й гармоники и  $K_e$ ,  $K_h$  – коэффициенты потерь в железе сердечника. В табл. 2 представлены основные параметры постоянных магнитов и электротехнической стали.

На рис. 11, 12 представлены графики распределения радиальных и тангенциальных составляющих гармоник индукции магнитного поля вдоль воздушного зазора между наружным ротором управления и ферромагнитными сегментами и внутренним быстроходным ротором и ферромагнитными сегментами. Таблица 2. Параметры магнитного состояния постоянных магнитов и стали

 Table 2.
 Parameters of magnetic state of permanent magnets and steel

Параметр/Parameter	Значение Value
Относительная магнитная проницаемость магнитов Relative magnetic permeability	1,0998
Объемная проводимость постоянных магнитов Bulk conductivity of permanent magnets	625000 см/м (cm/m)
Плотность постоянных магнитов Permanent magnet density	7400 кг/м <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )
Плотность электротехнической стали Electric steel density	7820 кг/м³ (kg/m³)
Коэффициент заполнения магнитопровода Magnetic core load factor	0,95
Ke	0,91
Kh	366
Материал постоянных магнитов Permanent magnet material	NbFeB-35

Из расчетов следует, что в ферромагнитных элементах в данном варианте геометрии магнитной трансмиссии потери составляют 8 кВт, что не превышает 2 % от полной мощности машины, равной 1,2 МВт. Отметим, что в конструкции машины отсутствуют короткозамкнутые контура, где имели бы место вихревые токи и создавался нагрев со значительной потерей КПД.

## Выводы

В результате проведенных исследований получено математическое описание, позволяющее анализировать динамические процессы в магнитной трансмиссии. Методом численного моделирования были получены основные характеристики магнитной трансмиссии. Анализ расчета механической характеристики позволяет сделать вывод о взаимосвязи между геометрией магнитной трансмиссии, скорости вращения роторов и передаточным отношением. Также линейный характер связи передаточного отношения и скорости вращения ротора управления говорит о широком изменении скоростей тихоходного и быстроходного валов в пределах заданной мощности звена управления трансмиссией. Взаимосвязь между максимальным крутящим моментом на быстроходном валу и геоме-



**Рис. 11.** Распределение радиальных составляющих гармоник плотности магнитного поля вдоль воздушного зазора между модулирующими сегментами и: а) верхним ротором управления; б) быстроходным ротором

*Fig. 11.* Distribution of radial components of magnetic field density harmonics along air gap between modulate segments and: a) upper control rotor; b) high speed rotor



**Рис. 12.** Распределение тангенциальных составляющих гармоник плотности магнитного поля вдоль воздушного зазора между модулирующими сегментами и: а) верхним ротором управления; б) быстроходным ротором

*Fig.* 12. Distribution of tangential components of magnetic field density harmonics along air gap between modulate segments and: a) upper control rotor; b) high speed rotor

трическими параметрами машины позволяет сделать вывод о возможности создания методики проектирования магнитной трансмиссии с переменным передаточным отношением с учетом конкретных технических требований. Анализ результатов полевых расчетов магнитного поля показал, что возможна передача механической энергии от тихоходного вала к быстроходному при минимальных энергетических потерях в силу отсутствия короткозамкнутых контуров, где возможны проявления вихревых токов, которые создают перегрев и потерю КПД.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Голов П.В., Шаров Ю.В., Строев В.А. Система математических моделей для расчета переходных процессов в сложных электроэнергетических системах // Электричество. – 2007. – № 5. – С. 2–11.
- Енин В.Н., Степанов А.В. Моделирование переходных процессов и анализ динамической устойчивости синхронных генераторов при воздействии больших возмущений // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2012. – № 10. – С. 495–504.
- Криворот А.В. Неоднозначное влияние распределенной генерации на динамическую устойчивость в распределительной сети при тяжелых возмущениях // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Междунар. науч. семинар им. Руденко Ю.Н. Иркутск, 2014. С. 156–163.
- Игуменщев В.А., Малафеев А.В., Буланова О.В. Расчет и анализ динамической устойчивости узлов нагрузки промышленных предприятий с собственными электростанциями // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2006. № 4. С. 94–98.
- Расчет динамических характеристик синхронных и асинхронных двигателей промышленных предприятий с целью анализа устойчивости систем электроснабжения / Игуменщев В.А., Малафеев А.В., Буланова О.В., Ротанова Ю.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. № 2. С. 71–75.
- Представление машин переменного тока в расчетах динамической устойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями / Заславец Б.И., Игуменщев В.А., Малафеев А.В., Буланова О.В., Ю.Н. Ротанова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2008. – № 11 (111). – С. 3–8.
- Кирпиченкова В.Я. Влияние канала регулирования частоты вращения вала асинхронизированного синхронного электромеханического преобразователя частоты на стохастическую устойчивость межсистемной гибкой связи // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2007. – № 5. – С. 38–43.
- Динамическая устойчивость электромеханических комплексов с синхронными и асинхронными двигателями на предприятиях нефтедобычи / Абрамович Б.Н. и др. // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 3. – С. 17–25.
- Активная компенсация провалов и искажений напряжения в системах электроснабжения нефтедобывающих предприятий / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Д.А. Устинов, А.Я. Шклярский // Промышленная энергетика. – 2012. – № 4. – С. 23–25.
- Яндульский А.С., Марченко А.А., Нестерко А.Б. Оценка динамических характеристик многомашинных электроэнергетических систем на основе данных системы мониторинга переходных режимов // Научные труды Винницкого национального технического университета. – 2014. – № 4. – С. 1–9.
- 11. Беляев А.Н. Повышение динамической устойчивости автоном-

ных энергосистем нефтегазодобывающих комплексов на основе электрического торможения // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2008. – № 63. – С. 163–169.

- Альдо В. да Роза. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы. – М.: ИД «Интеллект», МЭИ, 2010. – 704 с.
- Удалов С.Н. Возобновляемые источники энергии. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 458 с.
- Удалов С.Н., Манусов В.З. Моделирование ветроэнергетических установок и управление ими на основе нечеткой логики: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 200 с.
- Анализ переходных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий, имеющих в своем составе объекты малой энергетики / О.В. Буланова, А.В. Малафеев, Ю.Н. Ротанова, В.М. Тарасов // Промышленная энергетика. – 2010. – № 4. – С. 22–28.
- 16. Comparative study between mechanical and magnetic planetary gears / E. Gouda et al. // Magnetics, IEEE. - 2011. - T. 47. -№ 2. - P. 439-450.
- Comparison of coaxial magnetic gears with different topologies / L. Jian et al. // Magnetics, IEEE. - 2009. - T. 45. - № 10. -P. 4526-4529.
- A novel «Pseudo» direct-drive brushless permanent magnet machine / K. Atallah et al. // Magnetics, IEEE Transactions on. – 2008. – T. 44. – № 11. – P. 4349–4352.
- Montague R., Bingham C., Atallah K. Servo control of magnetic gears // Mechatronics, IEEE/ASME – 2012. – T. 17. – № . 2. – P. 269–278.
- Polinder H. Trends in Wind Turbine Generator Systems // IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics. – 2013 September. – V. 1. – № 3. – P. 174–185.
- 21. Neuland A.H. Apparatus for transmitting power. US Patent 1171351, Feb. 1916.
- Development of a high-performance magnetic gear / P.O. Rasmussen et al. // Industry Applications, IEEE. 2005. T. 41. № 3. P. 764–770.
- Peng S., Fu W.N., Ho S.L. A Novel High Torque-Density Triple-Permanent-Magnet-Excited Magnetic Gear // Magnetics, IEEE. – 2014. – T. 50. – № 11. – P. 1–4.
- Aho J.P., Kraft L.G. Control of a Wind Turbine with a Magnetic Continuously Variable Transmission for Mitigation of Torque Variations // Proc. of the 2011 AIAA/ASME Wind Symposium. – USA, Orlando, 2011. – 28 p.
- Wang J., Atallah K., Carvley S.D. A magnetic continuously variable transmission device // Magnetics, IEEE. 2011. T. 47. № 10. - P. 2815-2818.

Поступила 10.05.2015.

UDC 621.3.077.2:621.3.077.3

## RESEARCH OF MAGNETIC TRANSMISSION WITH VARIABLE GEAR RATIO IN A WIND-DRIVEN GENERATOR FOR IMPROVING DYNAMIC STABILITY STOKE

## Sergey N. Udalov,

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks Prospect, Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: oudalovsn@yandex.ru

## Alexander G. Pristup,

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks Prospect, Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: a pristup@mail.ru

## Andrey A. Achitaev,

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks Prospect, Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: ac-an-alec@mail.ru

The relevance of the research is caused by the fact that in Russia more than 2/3 of the territories is not provided with centralized power supply. There are small isolated energy systems, consisting of several loads of 1 to 15 MW. Unfortunately, the share of world production of small power stations is limited to 25 %. Another share falls on large turbine generators, power over 20 MW. One of the reasons for limited use of small power plants is their small stock of dynamic stability due to their low inertia. Let us mention that the dynamic stability is disturbed when sudden changes occur in load conditions or at short circuits. Single-phase circuits are observed in 70 % of the total number of disturbances that may cause disconnection of a load part or electric power generators in the system. This can result in asynchronous mode of the remaining generators. The paper introduces the method for maintaining a synchronous speed of a generator rotation by means of electromechanical complex based on magnetic transmission with variable gear ratio as a part of a low-power wind-driven generator.

The main aim of the study is to increase the dynamic stability stock of power systems with distributed generation, having in its composition several low-power electric generators.

**The methods.** The finite element method is used for geometry analysis of magnetic transmission with variable gear ratio on the basis of Maxwell 2D. The mathematical model based on magnetic fields equations was developed to determine the torque and its dependence on a rotor angular point.

**The results.** The authors have obtained the mathematical model of magnetic transmission. It leads to the conclusion that there is the relationship of geometrical parameters and the magnitude of the maximum electromagnetic torque. The linear relationship was established between the transmission ratio and rotor control speed. The paper considers the analysis of the pole pair numbers ratio in the rotor magnetic transmission construction and their interconnection between the moments on slow and high-speed shafts. The author determined the dependence of the torque on the angular position of the high-speed link rotor and analyzed the magnetic fields of magnetic transmission to define the magnitude of losses in ferromagnetic yokes.

#### Key words:

Wind turbine, magnetic transmission, dynamic stability, synchronous machine, mathematical model.

## REFERENCES

- Golov P.V., Sharov Yu.V., Stroyev V.A. Sistema matematicheskikh modeley dlya rascheta perekhodnykh protsessov v slozhnykh elektroenergeticheskikh sistemakh [Mathematical Models for Transients Simulation in Electrical Power Systems]. *Electricity*, 2007, no. 5, pp. 2–11.
- Enin V.N., Stepanov A.V. Modelirovanie perekhodnykh protsessov i analiz dinamicheskoy ustoychivosti sinkhronnykh generatorov pri bolshikh vozmushcheniyakh [Simulation of transient and dynamic stability analysis of synchronous generators when exposed to large perturbations]. *Nauka i obrazovanie*, 2012, no. 10, pp. 495–504.
- 3. Krivorot A.V. Neodnoznachnoe vliyanie raspredelennoy generatsii na dinamicheskuyu ustoychivost v raspredelennoy seti pri tyazhelykh vozmushcheniyakh [Ambiguous impact of distributed generation on the dynamic stability of the distribution network in severe disturbances]. Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bolshikh sistsm energetiki. Mezhdunarodny seminar imeni Rudenko Yu.N. [Methodical issues of researching the reliability of large-scale power systems. Intern. Scientific Seminar named after Rudenko Yu.N.]. Irkutsk, 2014. pp. 156–163.
- Igumenschev V.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V. Raschet i analiz dinamicheskoy ustoychivosti uzlov nagruzki promyshlennykh predpriyaty s sobstvennymi elektrostantsiyami Известия вы-

сших учебных заведений. Электромеханика [Calculation and analysis of dynamic stability of load at the industrial enterprises with their own power plants]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeny. Elektromekhanika*, 2006, no. 4, pp 94–98.

- Igumenshev V.A., Malafeev A.V., Bulanov O.V., Rotanova Yu.N. Raschet dinamicheskikh kharakteristik sinkhronnykh i asinkhronykh dvigateley promyshlennykh predpriyatiy s tselyu analiza ustoychivosti sistem elektrosnabzhenya [Calculation of dynamic characteristics of synchronous and asynchronous motors at industrial enterprises to analyze the stability of power supply systems]. Vestnik magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni G.I. Nosova, 2006, no. 2, pp. 71–75.
- Zaslavets B.I., Igumenshev V.A., Malafeev A.V., Bulanov O.V., Rotanova Yu.N. Predstavlenie mashin peremennogo toka v raschetakh dinamicheskoy ustoychivosti sistmem electrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy s sobstvennymi electrostantsiyami [Presentation of AC machines in calculation of dynamic stability of power supply systems of industrial enterprises with their own power stations]. Vestnik yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika, 2008, no. 11 (111), pp. 3–8.
- Kirpichenkova V.Ya. Vliyanie kanala regulirovaniya chastoty vrashcheniya vala asinkhronizirovannogo sinkhronnogo electromekhanickheskogo preobrazovatelya chastoty na stokhastiches-

kuyu ustoiychivost mezhsistemnoy gibkoy svyazi [Effect of the channel for controlling the shaft speed of asynchronized synchronous electromechanical transducer on stochastic stability of intersystem flexible connection]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeny. Elektromekhanika*, 2007, no. 5, pp. 38–43.

- Abramovich B.N., Ustinov D.A., Sychev Yu.A., Plotnikov I.G. Dinamicheskaya ustoychivost elektromekhanicheskikh kompleksov s sinkhronnymi i asinkhronnymi dvigatelyami na predpriyatiyakh neftedobychi [Dynamic stability of electromechanical complexes with synchronous and asynchronous motors at oil and gas enterprises]. *Electronic scientific journal «Oil and gas enterprises»*, 2011, no. 3, pp. 17–25.
- Abramovich B.N., Sychev Yu.A., Ustinov D.A., Shklyarsky A.Ya. Activnaya compensatsiya provalov i iskazheny napravleny v sistemakh electrosnabzheniya neftedobyvayushchikh predpriyatiy [Active compensation of failures and voltage distortion in power supply systems of oil producing companies]. *Promyshlennaya energetika*, 2012, no. 4, pp. 23–25.
- 10. Yandulsky A.S., Marchenko A.A., Nesterko A.B. Otsenka dinamicheskikh kharakteristik mnogomashinnykh electroenergeticheskikh sistem na osnove dannykh sistemy monitoringa perekhodnykh rezhimov [Assessment of dynamic performance of multicomputer electric power systems on the basis of the monitoring system transients]. Nauchnye trudy Vinnitskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta, 2014, no. 4, pp. 1–9.
- 11. Belyaev A.N. Povyshenie dinamicheskoy ustoychivosti avtonomnykh energosistem neftegazodobyvayushchikh komleksov na osnove electricheskogo tormozhenya [Increasing the dynamic stability of the autonomous power supply systems based on oil and gas complexes of electric braking]. Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Petterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta, 2008, no. 63, pp. 163–169.
- Aldo V. da Rosa. Vozobnovlyaemye istochniki energii. Fiziko-Tekhnicheskie osnovy [Renewable energy sources. Physical and technical bases]. Moscow, Intellect Publ. House, MEI, 2010. 704 p.
- Udalov S.N. Vozobnovlaemye istochniki energii [Renewable energy sources]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ. House, 2013. 458 p.
- 14. Udalov S.N., Manusov V.Z. Modelirovanie vetroenergeticheskikh ustanovok i upravlenie imi na osnove nechetkoy logiki [Modeling

of wind power plants and controlling them based on fuzzy logic]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ. House, 2013. 200 p.

- 15. Bulanova O.V., Malafeev A.V., Rotanova Yu.N., Tarasov V.M. Analiz perekhodnykh rezhimov sistem elektrosnabzhenya promyshlennykh predpriyatiy, imeyushchikh v svoem sostave obekty maloy energetiki [Analysis of transient modes of power supply systems at industrial enterprises with small power]. *Promyshlennaya energetika*, 2010, no. 4, pp. 22–28.
- Gouda E. Comparative study between mechanical and magnetic planetary gears. *Magnetics, IEEE*, 2011, vol. 47, no. 2, pp. 439-450.
- Jian L. Comparison of coaxial magnetic gears with different topologies. *Magnetics, IEEE*, 2009, vol. 45, no. 10, pp. 4526–4529.
- Atallah K. A novel «Pseudo» direct-drive brushless permanent magnet machine. *Magnetics, IEEE*, 2008, vol. 44, no. 11, pp. 4349-4352.
- Montague R., Bingham C., Atallah K. Servo control of magnetic gears. *Mechatronics*, *IEEE/ASME*, 2012, vol. 17, no. 2, pp. 269-278.
- Polinder H. Trends in Wind Turbine Generator Systems. *IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics*, 2013 September, vol. 1, no. 3, pp. 174–185.
- 21. Neuland A.H. Apparatus for transmitting power. US Patent 1171351, Feb. 1916.
- Rasmussen P.O. Development of a high-performance magnetic gear. *Industry Applications, IEEE*, 2005, vol. 41, no. 3, pp. 764-770.
- Peng S., Fu W.N., Ho S.L. A Novel High Torque-Density Triple-Permanent-Magnet-Excited Magnetic Gear. *Magnetics, IEEE*, 2014, vol. 50, no. 11, pp. 1–4.
- Aho J.P., Kraft L.G. Control of a Wind Turbine with a Magnetic Continuously Variable Transmission for Mitigation of Torque Variations. *Proc. of the 2011 AIAA/ASME Wind Symposium*. USA, Orlando, 2011. pp. 1–28.
- Wang J., Atallah K., Carvley S.D. A magnetic continuously variable transmission device. *Magnetics, IEEE*, 2011, vol. 47, no. 10, pp. 2815–2818.

Received: 10 May 2015.

УДК 550.832.6:622

# ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ МНОГОПЛАСТОВЫХ СКВАЖИН С ЭЦН ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО И ПРОМЫСЛОВО-ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

## Панарина Екатерина Павловна,

аспирант кафедры геофизических информационных систем Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 65; ведущий специалист отдела диагностики и управления разработкой ООО «Газпромнефть НТЦ», Россия, 117246, г. Москва, Научный пр., 19. E-mail Panarina.EP@gazprom-neft.ru

## Кременецкий Михаил Израилевич,

д-р техн. наук, профессор, руководитель направления по исследованиям скважин отдела диагностики и управления разработкой ООО «Газпромнефть НТЦ», Россия, 117246, г. Москва, Научный пр., 19. E-mail Kremenetskiy.MI@gazprom-neft.ru

## Кричевский Владимир Маркович,

руководитель направления по контролю разработки трудноизвлекаемых запасов отдела диагностики и управления разработкой ООО «Газпромнефть НТЦ», Россия, 117246, г. Москва, Научный пр., 19. E-mail Krichevskiy.VM@gazprom-neft.ru

## Ипатов Андрей Иванович,

д-р техн. наук, профессор, начальник управления геофизических и гидродинамических исследований ООО «Газпромнефть НТЦ», Россия, 117246, г. Москва, Научный пр., 19. E-mail, Ipatov.Al@gazprom-neft.ru

## Биккулов Марсель Минуллович,

начальник отдела повышения нефтеотдачи пластов ООО «Газпромнефть-Хантос», Россия, 628011, г. Ханты-Мансийск, ул. Ленина, 56. Email: Bikkulov.MM@hantos.gazprom-neft.ru

## Коновалов Алексей Олегович,

главный специалист отдела повышения нефтеотдачи пластов ООО «Газпромнефть-Хантос», Россия, 628011, г. Ханты-Мансийск, ул. Ленина, 56. Email: Konovalov.AO@hantos.gazprom-neft.ru

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью оптимизации работы многопластовых скважин с электроцентробежными насосами на основе оценки индивидуальных свойств эксплуатируемых совместно пластов.

**Цель работы:** анализ информативности и усовершенствование методики комплексных промыслово-геофизических и гидродинамических исследований многопластовых скважин на технологической депрессии (при оборудовании скважин байпасными системами «Y-tool»); разработка, апробация и внедрение методики мониторинга индивидуальных параметров совместно вскрытых низкодебитных пластов с целью получения достоверной информации о выработке пластов; обоснование и рекомендации мероприятий по оптимизации работы скважин на основе результатов мониторинга, а также увеличение охвата вытеснения и увеличения добычи нефти.

**Методы исследования:** математическое моделирование полей температуры и давления в действующей скважине, проведение и интерпретация результатов промыслово-геофизических и гидродинамических исследований скважин, анализ результатов разновременных исследований.

**Результаты.** Установлено, что при работе многопластовой скважины на технологической депрессии (с применением байпасного оборудования «Y-tool») в условиях коллекторов с низкой проницаемостью оценка дебитов продуктивных пластов возможна только по результатам термометрии. Наиболее результативным в рассматриваемых условиях является оценка дебитов вне интервалов работающих пластов. Периодические проведения данных исследований дают возможность контролировать динамику выработки пластов. Выполнен совместный анализ разновременных циклов термических исследований в совокупности с данными долговременного мониторинга дебита скважин и давления на забое с целью контроля изменения во времени индивидуальных параметров пластов (дебитов, фильтрационных свойств, пластовых давлений, скин-фактора). Представлены примеры оптимизации работы скважин по результатам применения комплексного анализа.

## Ключевые слова:

Нефть, контроль разработки, термические исследования скважин, гидродинамические исследования скважин, промысловогеофизические исследования скважин (ПГИ). Раздельная эксплуатация нескольких нефтяных объектов с низкой проницаемостью (от десятых долей единиц до первых единиц мД), как правило, экономически нецелесообразна. Единственным оправданным вариантом в данных условиях может являться совместная разработка многопластовых объектов единой сеткой скважин. Причем в подобных скважинах перед вводом в эксплуатацию каждый низкопроницаемый пласт обычно интенсифицируют трещиной гидравлического разрыва пласта (ГРП).

Данные факторы сильно затрудняют мониторинг индивидуальных фильтрационных и энергетических параметров совместно разрабатываемых пластов, хотя это является неотъемлемым требованием Госорганов РФ [1].

Ведущая роль в решении задачи индивидуального мониторинга совместно эксплуатируемых нефтяных пластов принадлежит промыслово-геофизическим исследованиями (ПГИ) и гидродинамическим исследованиям скважин (ГДИС) [2-8]. Комплексирование данных исследований позволяет определить фазовый состав притоков, изучить изменения энергетики, совершенства вскрытия и фильтрационных свойств пластов в процессе разработки. Результаты ГДИС позволяют контролировать совместные параметры пластов, а ПГИ оценить долю каждого пласта в объеме добычи из скважины. С помощью комплекса ГДИС-ПГИ определяют индивидуальные параметры объектов (дебит, продуктивность, проницаемость, скинфактор и пластовое давление). Полученная информация используется при оптимизации процессов разработки.

Такие работы в настоящее время активно проводятся в компании «Газпром нефть», успешным примером является Южная лицензионная территория (ЮЛТ) Приобского месторождения.

Отличительной особенностью проводимых на этом месторождении исследований является проведение циклических ПГИ в скважинах механизированного фонда с помощью байпасных систем «Ytool» и широкое использование в качестве технологии ГДИС долговременного дистанционного мониторинга давления на забое с помощью стационарного датчика, устанавливаемого на приеме электроцентробежного насоса (ЭЦН) [2]. Это способствует повышению информативности полученных результатов, поскольку позволяет контролировать не только текущие параметры, но и динамику отработки пластов.

В результате проведения мониторинговых работ на объектах ООО «Газпромнефть-Хантос» с использованием байпасных систем «Y-tool» получены качественные материалы, отражающие динамику работы совместно вскрытых продуктивных интервалов в условиях технологических режимов отбора [9]. Однако вследствие низкой производительности отдельных пластов не удалось определить интервальные дебиты с помощью механической расходометрии. Единственным методом, способным оценить вклад отдельных пластов в общий дебит скважины, оказалась термометрия. При этом вполне информативным способом оценки явилась интерпретация термограмм вне интервалов притока [10, 11].

В настоящее время на ЮЛТ Приобского месторождения выполнено 39 исследований в 17 скважинах опорного фонда с «Y-tool», по которым изучен характер неравномерной выработки пластов (преимущественное дренирование вышележащего объекта  $AC_{10}^{***}$  и интенсивный переток в нижележащий объект  $AC_{12}^{***}$ ) и приняты меры для ее устранения [12, 13].

Данные о высоком давлении в верхнем пласте подтверждаются результатами гидродинамических исследований. По большинству ГДИС выявлено, что скважины испытывают воздействие системы поддержания пластового давления (ППД). Этот факт установлен по динамике обводненности продукции, стабилизации забойного давления и дебита и характерным особенностям диагностического Log-Log графика. Результаты комплекса ГДИС-ПГИ показывают, что на показатель продуктивности основное влияние оказывает изменение пластового давления, а ухудшения фильтрационных свойств во времени не наблюдается.

Предложено два решения по оптимизации работы пластов: изменение депрессии (где это еще возможно) на нижележащий объект  $AC_{12}^{***}$  либо изоляция вышележащего обводненного объекта  $AC_{10}^{***}$ .

Наглядным примером оптимизации депрессии является скважина 14<sup>\*\*\*</sup>, в которой было выполнено несколько разновременных циклов ПГИ (22.08.2014 г., 14.10.2014 г., 28.10.2014 г. и 15.02.2015 г.) в условиях монотонного снижения во времени забойного давления.

Каждый цикл ПГИ включал:

- регистрацию фоновых диаграмм давления, температуры и параметров состава в условиях длительной остановки скважины перед запуском на технологический режим отбора;
- серию разновременных записей непосредственно после запуска и в процессе стабилизации режима.

Фоновые диаграммы отражают преобладающее влияние межпластового перетока из пласта  $AC_{10}^{***}$ вниз в пласт  $AC_{12}^{***}$ , в статике. На рис. 1, *а* представлена динамика фонового поля давления и температуры от цикла к циклу. Хорошо видно, что со временем фоновое значение температуры увеличивается, приближаясь к геотермическому, причем наиболее интенсивно в четвертом цикле исследований, после оптимизации [14–17].

Такое поведение термограмм обусловлено характером изменения забойного давления в циклах исследования (рис 1, a, окно V). В первых циклах оно составляло около 13 МПа в кровле  $AC_{10}^{***}$  и около 15 МПа в кровле  $AC_{12}^{***}$ , во втором и третьем циклах получены аналогичные значения, а в четвертом цикле (после оптимизации) эти значения сни-



Рис. 1. Результаты исследований скважины 14<sup>™</sup>: а) I – колонка глубин; II – результаты ГИС в открытом стволе (диаграммы индукционного метода (ИМ) и метода самопроизвольной поляризации (СП)); III – диаграммы гамма метода (ГМ) и локатора муфт (ЛМ); IV – результаты термометрии (Т<sub>6</sub> – геотермограмма, Т<sub>F</sub> – фоновые термограммы при разновременных исследованиях); V – результаты барометрии, фоновый замер, при разновременных исследованиях; б) зависимость изменения забойного давления от времени

**Fig. 1.** Results of 14<sup>•••</sup> well survey: a) I is the depth column; II are the results of GIS in open hole (diagrams of induction method (IM) and spontaneous polarization method (SPM)); III are the diagrams of gamma method (GM) and collar locator (CL); IV are the results of thermometry ( $T_G$  is the geothermogram,  $T_F$  are the background thermograms at heterogeneous in time surveys); V are the results of barometry, baseline log, at heterogeneous in time surveys; 6) time dependence of bottom hole pressure change

зились соответственно до 8,7 и 10,5 МПа. Динамика изменения забойного давления по датчику ТМС показана на рис. 1, *б*.

Вследствие этого интенсивность межпластового перетока упала, и нижний пласт, ранее интенсивно охлаждаемый перетоком, подключился в работе и начинает прогреваться.

Факт ослабления влияния перетока после оптимизации становится более наглядным, если детально проанализировать результат каждого выполненного цикла ПГИ. Рассмотрим более подробно исследования в первом (от 22.08.2014 г.) цикле (рис 2, *a*): сначала был зарегистрирован фоновый замер термометром в остановленной скважине (термограмма  $T_F$  в окне V), затем выполнена серия термограмм после запуска насоса ( $T_{3ЦH}$ ). В этот период времени температура в стволе монотонно росла по мере снижения влияния перетока.

Тем не менее, результаты термометрии через 24 часа после запуска (термограмма T<sub>эцн.24</sub>) показали, что со временем выхода нижнего пласта на стабильный режим отбора не происходит. По всем термограммам при запуске скважины (рис. 2, *a*) диагностируется нисходящее движение жидкости из пласта AC<sub>10</sub><sup>\*\*\*</sup> и ее поглощение в подошве продуктивной толщи. Вследствие низкой депрессии в первом цикле исследований переток по стволу вниз, диагностируемый в статике, продолжается и в действующей скважине. Поведение кривых термометрии во втором (от 14.10.2014 г.) и третьем (от 28.10.2014 г.) циклах исследований аналогичны.

В четвертом цикле исследований, после резкого снижения давления на забое после оптимизации (рис. 2,  $\delta$ ), скважина повела себя иначе. Цикл начался с измерений температуры в статике и при запуске скважины (термограммы  $T_F$  и  $T_{3ЦH}$  в окне V), через сутки (термограмма  $T_{3ЦH-24}$ ) после запуска в стволе начался приток из всех перфорированных пластов – в цикле все пласты работают в режиме отбора.

По результатам термометрии: доля в суммарном дебите пласта  $AC_{10}^{***}$  в кровле продуктивной толщи составляет 99 %, суммарная доля нижележащего пласта – 1 %, дебит перетока составляет 3 % от дебита технологического режима.

Таким образом, видно, что задавленный нижний пласт по прошествии времени вследствие повышения депрессии начинает работать и вносит больший вклад в суммарную добычу. Однако на данном месторождении не всегда удается изменить депрессию с помощью снижения забойного давления, многие скважины работают с забойным давлением, не превышающим 3 МПа.

Далее рассмотрим пример по изоляции обводненного вышележащего объекта AC10<sup>\*\*\*</sup> на примере скважины 15<sup>\*\*\*</sup>. По результатам оптимизации процесса разработки был получен положительный эффект и прирост добычи нефти. На рис. 3 представлена история добычи из скважины 15<sup>\*\*\*</sup>, в которой на основе результатов целевых ПГИ была проведена оптимизация.



Рис. 2. Результаты исследований скважины 14<sup>™</sup> (а – от 20.08.2014 г., б – 07.02.2015г). I – колонка глубин; II – конструкция скважины со схемой движения флюида по стволу; III – результаты ГИС в открытом стволе (диаграммы ИМ и метода СП); IV – диаграммы ГМ и ЛМ; V – результаты термометрии (T<sub>6</sub> – геотермограмма, T<sub>F</sub> – фоновая термограмма, T<sub>3ЦН</sub> – термограмма в действующей скважине, A, B – интервалы вне работающих пластов, выбранные для оценки дебитов); VI – результаты барометрии; VII – результаты резистивиметрии; VIII – результаты влагометрии

**Fig. 2.** Results of 14<sup>\*\*\*</sup> well survey (a – 20.08.2014, 6 – 07.02.2015). I is the depth column; II is the well structure with fluid motion plan along the hole; III are the result of GIS in the open hole (IM and SPM diagrams); IV are the GM and CL diagrams; V are the results of thermometry ( $T_G$  is the geothermogram,  $T_F$  is the background thermogram,  $T_{UH}$  is the thermogram in the operating well); VI are the results of barometry; VII are the results of resistivimetry; VII are the results of water-cut log



**Рис. 3.** История работы скважины 15<sup>•••</sup>. 1 – обводненность; 2 – дебит нефти; 3 – дебит жидкости. После изоляции верхнего выработанного пласта существенно уменьшилась обводненность продукции и возрос дебит нефти

*Fig. 3.* 15<sup>*cr*</sup> well performance history. 1 – water cut; 2 – oil flowrate; 3 – liquid rate. After the upper depleted layer isolation the water cut of the product decreased and the oil flowrate increased

Скважина была запущена в эксплуатацию в январе 2008 г. с обводненностью 10 %. В процессе работы ввиду тесной интерференции с окружающим фондом с 2011 г. начался рост обводнения продукции. Для контроля выработки пластов было принято решение о проведении ПГИ с помощью оборудования «Y-Tool». Исследование показало, что преимущественный вклад в добычу вносит верхний пласт, также между верхним и нижним пластом наблюдается поведение термограмм, характерное для движения жидкости по стволу вниз – признак межпластового перетока в нижний пласт. После



Рис. 4. Результаты исследований скважины 15<sup>™</sup> (а – от 25.04.2014 г., б – 11.08.2014 г.). I – колонка глубин; II – конструкция скважины со схемой движения флюида по стволу; III – результаты ГИС в открытом стволе (диаграммы ИМ и метода СП); IV – диаграммы ГМ и ЛМ; V – результаты термометрии (T<sub>6</sub> – геотермограмма, T<sub>F</sub> – фоновая термограмма, T<sub>3UH</sub> – термограмма в действующей скважине, А, В – интервалы вне работающих пластов, выбранные для оценки дебитов); VI – результаты барометрии; VII – результаты барометрии; VII – результаты барометрии; VII – результаты со схемой движение, А, В – интервалы вне работающих пластов, выбранные для оценки дебитов); VI – результаты барометрии; VII – результаты барометрии; VII – результаты резистивиметрии; VIII – результаты влагометрии

Fig. 4. Results of 15<sup>\*\*\*</sup> well survey (a - 25.04.2014, 6 - 11.08.2014). I is the depth column; II is the well structure with fluid motion plan along the hole; III are the result of GIS in the open hole (IM and SPM diagrams); IV are the GM and CL diagrams; V are the results of thermometry (T<sub>G</sub> is the geothermogram, T<sub>F</sub> is the background thermogram, T<sub>3UH</sub> is the thermogram in the operating well, A, B are the intervals outside the functioning layers, selected for rate estimation); VI are the results of barometry; VII are the results of water-cut log

этого было принято решение об изоляции верхнего обводненного пласта и проведение ГРП на нижний пласт  $AC_{12}^{***}$  с целью увеличения добычи. Результаты проведенных промыслово-геофизических исследований представлены на рис. 4.

Для оценки эффективности ГТМ было проведено сопоставление диагностических графиков ГДИС для системы из двух совместно эксплуатируемых объектов (AC<sub>10</sub><sup>\*\*\*</sup>+AC<sub>12</sub><sup>\*\*\*</sup>) и для одного пласта AC<sub>12</sub><sup>\*\*\*</sup> – после проведенной изоляции (рис. 5).

По данным гидродинамическим исследованиям хорошо диагностируются системы потоков: влияние ствола скважины, линейный поток к трещине, псевдорадиальный [18-20]. Сопоставление результатов ГДИС показало изменение значений: гидропроводности, проницаемости и скин-фактора - по сравнению с первым исследованием ухудшились фильтрационные свойства пластовой системы, что естественно, поскольку из эксплуатации был выключен обводненный верхний пласт с лучшими коллекторскими свойствами. При этом стало возможным увеличение депрессии на нижний пласт и скважина увеличила дебит нефти. Уменьшение гидропроводности связано с уменьшением работающей толщины пластовой системы, а снижение проницаемости - с худшими фильтрационными свойствами нижележащего объекта АС12\*\*\*. Данное решение дало положительный результат. После проведения ГТМ был получен прирост добычи нефти более чем в 2 раза (таблица), а также снижены эксплуатационные затраты на подъем жидкости из пласта  $AC_{10}^{***}$ .





**Fig. 5.** Exploratory Log-Log graphs of the pressure (') and logarithmic derivative (") for hydrodynamic research before (1) and after (2) isolation of the upper watered layer, the measurement results are marked by dots, the results of hydrodynamic research interpretation by the alignment method are marked by solid lines

Дата/Параметры Date/Parameters	Работающая толщина, м Operative depth, m	Гидропроводность 10²мкм² м/мПа с F low capacity , 10²µm²m/mPa s	Проницаемость 10 <sup>-15</sup> мкm <sup>2</sup> Permeability, 10 <sup>-15</sup> $\mu$ m <sup>2</sup>	Дебит жидкости, м³/сут Liquid rate, m³/day	Дебит нефти, т/сут Oil flowrate, t/day
12.2014 (до РИР) (before isolation squeeze)	28,4	8,87	2,28	84	7
(пласты AC <sub>10</sub> ***+AC <sub>12</sub> ***)					
02.2015 (после РИР) (after isolation squeeze) (пласт AC <sub>12</sub> ***)	20,2	1,15	0,44	25	20
Итог проведенного геолого-технологического мероприятия (ГТМ) Result of geological and technological activities			- 59	+ 13	

Таблица.	Протокол результатов ГДИС по скважине 15***
Table.	Data sheet of the 15"" well hydrodynamic research

## Заключение

Анализ результатов ПГИ в опорной сети добывающих насосных скважин на Южно-Приобском месторождении показал, что при работе на технологической депрессии (с применением байпасного оборудования «Y-tool») в условиях низкопроницаемых низкодебитных коллекторов основным информативным методом оценки и мониторинга индивидуальных дебитов зарекомендовала себя термометрия.

Повышению информативности мониторинга в условиях совместного вскрытия нескольких пластов способствовали: 1) несколько циклов исследо-

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Закон РФ от 21.02.92 № 2395-І (ред. от 13.07.2015) «О недрах». URL: https://www.consultant.ru/popular/nedr/ (дата обращения 01.08.2015).
- Гуляев Д.Н., Мельников С.И., Кокурина В.В. Увеличение КИН в результате применения постоянного мониторинга забойных параметров на примере месторождения Западной Сибири // Российская техническая нефтегазовая конференция и выставка SPE по разведке и добыче. – М., 14–16 октября 2014.
- Ипатов А.И., Кременецкий М.И. Геофизический и гидродинамический контроль разработки месторождений углеводородов. – Ижевск: РХД, 2010. – 780 с.
- Кременецкий М.И., Ипатов А.И., Гуляев Д.Н. Информационное обеспечение и технологии гидродинамического моделирования нефтяных и газовых залежей. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. – 896 с.
- РД 153-39.0-109-01 Методические указания по комплексированию и этапности выполнения геофизических, гидродинамических и геохимических исследований нефтяных и газовых месторождений. – М., 2002. – 300 с.
- Ипатов А.И., Кременецкий М.И., Нуриев М.Ф. Опыт компании «Газпром нефть» в области применения экономичных «интеллектуальных» скважин // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 9. – С. 34–38.
- Геофизический мониторинг добывающих скважин с одновременно-раздельной эксплуатацией нескольких объектов / В.В. Лаптев, В.В. Береснев, И.Р. Адиев, И.П. Бабушкин // Каротажник. – 2012. – № 7-8 (217–218). – С. 65–79.

ваний, позволивших проследить динамику состояния пластов при изменении депрессии, а также 2) комплексирование ПГИ и ГДИС. Полученные результаты позволили оценить весь спектр индивидуальных параметров пластов, необходимых для обоснования ГТМ по увеличению охвата выработкой (оптимизация вытеснения, устранение межпластовых перетоков) и интенсификации притока.

Выполненные на Южно-Приобском месторождении исследования позволили дать достоверную оценку относительных дебитов пластов и интенсивности межпластовых перетоков. В частности, было выявлено преимущественное дренирование запасов из верхнего объекта  $\mathrm{AC}_{10}^{***}$ , определен межпластовый переток из вышележащего объекта АС<sub>10</sub>\*\*\* в нижележащий АС<sub>12</sub>\*\*\*. По результатам исследований были обоснованы и выполнены мероприятия по ремонтно-изоляционным работам (РИР) верхнего обводненного интервала. Во всех случаях (7 скважин) РИР дали положительный результат, прирост добычи скважин по нефти составил более 100 %, сократился также объем добычи жидкости. В итоге получен существенный прирост по добыче нефти и снижены затраты на подъем жидкости, подтверждена высокая степень выработки (степени промытости) изолируемого объекта.

Данная технология исследований и анализа, по мнению авторов, применима для всех многопластовых нефтяных месторождений, в первую очередь – для объектов с ухудшенными низкопроницаемыми коллекторами.

- Проселков Ю.М. Теплопередача в скважинах. М.: Недра, 1982. – 223 с.
- Глубинный мониторинг продуктивности совместно эксплуатируемых пластов при технологической депрессии / А.В. Барышников, О.А. Кофанов, Д.Р. Галеев, А.И. Ипатов, М.И. Кременецкий // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 12. – С. 30–33.
- Оценка индивидуальных эксплуатационных параметров совместно вскрытых низкодебитных пластов по комплексу геофизических исследований / С.И. Мельников, В.В. Кокурина, М.И. Кременецкий, Е.П. Панарина // Российская техническая нефтегазовая конференция и выставка SPE по разведке и добыче. – М., 14–16 октября 2014.
- Опыт реализации технологии контроля притока и его состава на технологическом режиме отбора при ОРЭ / С.И. Мельников, А.И. Ипатов, М.И. Кременецкий, Д.Ю. Колупаев, М.М. Биккулов, А.З. Аминев // Инженерная практика. – 2014. – № 1. – С. 42–47.
- Чекалюк Э.Б. Термодинамика нефтяного пласта. М.: Недра, 1965. – 238 с.
- Валиуллин Р.А., Рамазанов А.Ш. Термические исследования при компрессорном освоении нефтяных скважин. – Уфа: Издво Башкирского Государственного университета, 1992. – 165 с.
- Smith M.B. Fracture Width-Design vs. Measurement // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – New Orleans, Louisiana, 26–29 September 1982. URL: https://www.onepetro.org/ conference-paper/SPE-10965-MS (дата обращения 01.08.2015).

- Numerical Temperature Modeling for Quantitative Analysis of Low Compressible Fluid Production / A. Aslanyan, I. Aslanyan, A. Salamatin et al. // ADIPEC 2014 Conference. – Adu Dhabi, 10–13 November 2014.
- Curtis M.R., Witterholt E.J. Use of the temperature log for determining flowrates in producing wells: Society of Petroleum Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers // SPE 48<sup>th</sup> Annual Technical Conference and Exhibition. – Las Vegas, Nevada, October 1973.
- Witterholt E.J., Tixier M.P. Temperature logging in injection wells: Society of Petroleum Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – San Antonio, Texas, 1972.
- Узе О., Витура Д., Фьярэ О. Анализ динамических потоков: Теория и практика интерпретации данных ГДИС и анализа добычи, а также использование данных глубинных манометров. – М.: КАРРА, 1988. – 359 с.
- Blassingame T.A., Lee W.J. Pressure Buildup Test Analysis Variable Rate Case: a New Approach // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Anaheim, California, USA, June, 1989. – P. 273–280.
- Decline Curve Analysis Using material Balance Time / D.E. Doublet, P.K. Pande, T.J. McCollum, T.A. Blassingame // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – New Orleans, 19 October 1994.

Поступила 04.08.2015 г.

UDC 550.832.6:622

## OPTIMIZATION OF MULTI-PAY WELLS FUNCTIONING WITH ESP UNIT BY THE RESULTS OF HYDRODYNAMIC AND FIELD-GEOPHYSICAL MONITORING

## Ekaterina P. Panarina,

Gazpromneft STC, 19, Nauchny proezd, Moscow, 117246, Russia. E-mail: Panarina.EP@gazprom-neft.ru

## Mikhail I. Kremenetskiy,

Gazpromneft STC, 19, Nauchny proezd, Moscow, 117246, Russia. E-mail: Kremenetskiy.MI@gazprom-neft.ru

## Vladimir M. Krichevskiy,

Gazpromneft STC, 19, Nauchny proezd, Moscow, 117246, Russia. E-mail: Krichevskiy.VM@gazprom-neft.ru

## Andrey I. Ipatov,

Gazpromneft STC, 19, Nauchny proezd, Moscow, 117246, Russia. E-mail: Ipatov.Al@gazprom-neft.ru

## Marsel M. Bikkulov,

Gazpromneft Khantos, 56, Lenin street, Khanty-Mansiysk, 628011, Russia. E-mail: Bikkulov.MM@hantos.gazprom-neft.ru

## Aleksey O. Konovalov,

Gazpromneft Khantos, 56, Lenin street, Khanty-Mansiysk, 628011, Russia. E-mail: Konovalov.AO@hantos.gazprom-neft.ru

**Relevance** of the research is caused by the necessity to optimize the operation of multipay wells with electric-cintrifugal pumps using layers individual parameters.

**The aim** of the research is to analyze the information content and to improve the technique of complex production-geophysical studies of multipay wells equipped with «Y-Tool» bypasses; to develop, approve and implement the method for monitoring the individual parameters of the tapped marginal layers to obtain the reliable information on production profile along the wellbore; to recommend the activities to optimize production basing on monitoring results, sweep efficiency and production enhancement.

**Results.** It was ascertained that it is possible to assess the productive layers rates by the results of thermometry at multipay well operation at pressure drawdown (applying the «Y-Tool» bypasses) with the collectors of low permeability. The most efficient thing in the considered conditions is the assessment of the rates outside the intervals of operating wells. Periodical surveys allow controlling the dynamic of layers depletion. The authors analyzed the temperature surveys at different times along with permanent pressure gauges data to dynamic cally monitor individual layers parameters (rates, pressures, skin etc). Analysis results are successfully used to optimize production.

## Key words:

Oil, development surveillance, well thermal surveys, well testing, production log test (PLT).

**Research methods:** mathematical modeling of temperature and pressure fields in producing well, well testing and production logging, interpretation and complex analysis of all tests.

### REFERENCES

- Zakon RF, 21.02.92 no. 2395-I (13.07.2015) «O nedrakh» [Law of the Russian Federation from 21.02.92 no. 2395-I (07.13.2015)]. Available at: https://www.consultant.ru/popular/nedr/ (accessed 01 August 2015).
- Gulyaev D., Melnikov S.I., Kokurina V.V. Uvelichenie KIN v rezultate primeneniya postoyannogo monitoring parametrov na primere mestorozhdeniya Zapadnoy Sibiri [Recovery Increase by Permanent Downhole Gages Data. Western Siberia Field Case Study]. Rossiyskaya tekhnicheskaya neftegazovaya konferentsiya i vystavka SPE po razvedke i dobyche [Russian technical oil and gas conference and exhibition SPE in exploration and production]. Moscow, 14–16 October 2014.
- Ipatov A.I., Kremenetskiy M.I. Geofizichesky i gidrodinamichesky control razrabotki mestorozhdeny uglevodorodov [Geophysical and hydrodynamic control of the development of hydrocarbon deposits]. Izhevsk, RKhD Press, 2010. 780 p.
- Kremenetsky M.I., Ipatov A.I., Gulyaev D.N. Informatsionnoe obespechenie i tekhnologii gidrodinamicheskogo modelirovaniya neftyanykh i gazovykh zalezhey [Information provision and technology of hydrodynamic modeling of oil and gas deposits]. Izhevsk: Institute of Computer Science, 2012. 896 p.
- RD 153-39.0-109-01 Metodicheskie ukazaniya po kompleksirovaniyu i etapnosti vypolneniya geofizicheskikh, gidrodinamicheskikh i geokhimicheskikh issledovany neftyanykh i gazovykh mestorozhdeny [RD 153-39.0-109-01 Guidelines for the integrator and phasing geophysical, hydrodynamic and geochemical studies of oil and gas fields]. Moscow, 2002. 300 p.
- Ipatov A.I., Kremenetskiy M.I., Nuriyev M.F. Opyt kompanii «Gazprom neft» v oblasti ekonomichnykh «intellektualnykh» skvazhin [The experience of Gazprom Neft in using fuel-efficient «smart» wells]. Oil Industry, 2011, no. 9, pp. 34–38.
- Laptev V.V., Beresnev V.V., Adiev I.R., Babushkin I.P. Geofizichesky monitoring dobyvayushchikh skvazhin s odnovremennorazdelennoy ekspluatatsiey neskolkikh obektov [Geophysical monitoring of wells with dual completion of several objects]. *Karotazhnik*, 2012, no. 7–8 (217–218), pp. 65–79.
- 8. Proselkov Yu.M. *Teploperedacha v skvazhinakh* [Heat transfer in the wells]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 223 p.
- Baryshnikov A.V., Kofanov O.A., Galeev D.R., Ipatov A.I., Kremenetskiy M.I. Glubinny monitoring productivnosti sovmestno eksplyatiruemykh plastov pri tekhnologicheskoy depressii [Deep monitoring of productivity of jointly operated layers at technological depression]. *Oil industry*, 2011, no. 12, pp. 30–33.
- Melnikov S.I., Kokurina V.V., Kremenetskiy M.I., Panarin E.P. Otsenka individualnykh ekspluatatsionnykh parametrov sovmestno vskrytykh nizkodebitnykh plastov po kompleksu geofizicheskikh issledovany [New way of individual evaluation of tight comingled reservoirs]. Rossiyskaya tekhnicheskaya neftegazova-

ya konferentsiya i vystavka SPE po razvedke i dobyche [Russian technical oil and gas conference and exhibition SPE in exploration and production]. Moscow, 14–16 October 2014.

- 11. Melnikov S.I., Ipatov A.I., Kremenetskiy M.I., Kolupaev D.Yu., Bikkulov M.M., Aminev A.Z. Opyt realizatsii tekhnologii kontrolya pritoka i ego sostava na tekhnologicheskom rezhime otbora pri ORE [Experience in implementation of inflow control technologies and its composition in the process mode selection in the WEM]. *Engineering Practice*, 2014, no. 1, pp. 42–47
- Chekalyuk E.B. Termodinamika neftyanogo plasta [Thermodynamics oil reservoir]. Moscow, Nedra Publ., 1965. 238 p.
- Valiullin R.A., Ramazanov A.Sh. Termicheskie issledovaniya pri kompressornom osvoenii neftyanykh skvazhin [Thermal studies in compressor exploration of oil wells]. Ufa, Bashkir State University Press, 1992. 165 p.
- Smith M.B. Fracture Width-Design vs. Measurement. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, Louisiana, 26-29 September 1982. Available at: https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-10965-MS (accessed 01 August 2015).
- Aslanyan A., Aslanyan I., Salamatin A. Numerical Temperature Modeling for Quantitative Analysis of Low Compressible Fluid Production. *ADIPEC 2014 Conference*. Adu Dhabi, 10–13 November 2014.
- 16. Curtis M.R., Witterholt E.J. Use of the temperature log for determining flowrates in producing wells: Society of Petroleum Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers. SPE 48th Annual Technical Conference and Exhibition. Las Vegas, Nevada, October 1973.
- Witterholt E.J., Tixier M.P. Temperature logging in injection wells: Society of Petroleum Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio, Texas, 1972.
- 18. Uzes O., Vitura D., Fyare O. Analiz dinamicheskikh potokov: teoriya i praktika dannykh GDIS i analiza dobychi, a takzhe ispolzovanie dannykh glubinnykh manometrov [Analysis of dynamic flows. Theory and practice of well test data interpretation and analysis of the production and use of data-depth gauge]. Moscow, Kappa Publ., 1988. 359 p.
- Blassingame T.A., Lee W.J. Pressure Buildup Test Analysis Variable Rate Case: a New Approach. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Anaheim, California, USA, June, 1989. pp. 273–280.
- Doublet D.E., Pande P.K., McCollum T.J., Blassingame T.A. Decline Curve Analysis Using material Balance Time. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, 19 October 1994.

Received: 04 August 2015.

УДК 552.578.2.061.4.08:539.215(571.1)

## ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАК ОСНОВНОЙ МЕТОД ОБОСНОВАНИЯ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАСТОВ-КОЛЛЕКТОРОВ ЮК<sub>2-5</sub> ЕМ-ЕГОВСКОЙ ПЛОЩАДИ (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

## Кудряшова Лидия Константиновна,

аспирант, ассистент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: KudryashovaLK@tpu.ru

Актуальность работы обусловлена возрастанием значимости извлекаемых запасов нефти в коллекторах глубокозалегающих горизонтов. Это требует более детального изучения условий их формирования. Гранулометрические и минералогические исследования терригенных отложений позволяют получить первичные представления об условиях их осадконакопления. При этом комплексное использование существующих методов помогает однозначно решить некоторые вопросы фациального анализа. **Цель работы:** определение фациальной обстановки с помощью гранулометрического и минералогического анализов на примере пластов ЮК<sub>2-5</sub> Красноленинского месторождения Ем-Еговской площади.

**Методы исследования:** гранулометрический и минералогический анализы: обобщенное определение обстановки по Фюхтбауэру и Мюллеру; определение генезиса отложений по соотношению отсортированности и особенностям асимметрии (диаграмма К. Бьёрликке); определение условий седиментации по соотношению асимметрии и эксцесса (динамогенетическая диаграмма Г. Ф. Рожкова); определение способа переноса обломочных частиц в водной среде (генетическая диаграмма Р. Пассеги); анализ состава аутигенных минералов, присутствующих в породах.

**Результаты**. В работе предлагается комплексное использование методов определения генезиса по данным гранулометрического и минералогического анализов по определенной схеме. Согласно данной схеме каждым последующим методом уточнялись условия осадконакопления, что позволило более объективно определить условия формирования осадка. По совокупности гранулометрических и минералогических исследований сделан вывод, что изучаемые отложения были сформированы в пределах эстуария. Результатами проведённых исследований показано, что при одинаковых динамических условиях накопления и сходных гранулометрических распределениях частиц могут быть разные обстановки седиментации и только благодаря комплексному анализу можно повысить объективность фациального прогноза.

#### Ключевые слова:

Фациальный анализ, гранулометрический анализ, минералогический анализ, генетические диаграммы, Красноленинское месторождение, тюменская свита, эстуарий.

### Введение

В последние годы одними из основных источников увеличения запасов нефти и газа являются залежи углеводородов глубокозалегающих горизонтов со сложным геологическим строением и неоднозначными фильтрационно-емкостными свойствами коллекторов. Повышение эффективности поисков, разведки и разработки рассматриваемых объектов требует построения качественно новых геологических моделей.

Экономическая целесообразность их разработки основывается на надежности прогноза распространения коллектора и анализе условий его формирования, влияющих на выбор технологической схемы эксплуатации залежи углеводородов. Одним из методов прогноза особенностей строения и пространственного развития нефтеносного пласта является фациальный анализ отложений его слагающих, благодаря которому изучение ряда свойств геологического объекта выполняется не в целом, а в отдельности для каждой фации.

При фациальном анализе осадочных образований важнейшая роль принадлежит гранулометрическим исследованиям. Это связано с тем, что, по мнению большинства литологов, особенности распределения обломочных частиц по фракциям являются индикаторами среды осадконакопления в палеогеографическом смысле (Л.Б. Рухин, Р. Фолк, Г. Фридман и другие) или особенностей динамической структуры процесса седиментации (Р. Пассега и другие) [1, 2].

## Методика литолого-фациального анализа

Многие исследователи, в частности Л.Б. Рухин, Б.К. Саху, Ф. Шепард, Б. Гринвуд, Дж.Е. Клован, Р. Янг и другие, пришли к выводу, что отдельные статистические характеристики фракционного состава осадков, а также разные парные сочетания их не могут диагностировать обстановки осадкообразования [1, 3]. Необходимо учитывать, что схожие динамические условия накопления и, естественно, одинаковые гранулометрические распределения частиц, могут соответствовать разным средам. Поэтому необходимо комплексное использование методик генетической интерпретации гранулометрических данных, что позволит точнее спрогнозировать условия осадконакопления.

Для предварительной ориентировки генетической принадлежности осадков и пород по гранулометрическим характеристикам целесообразно привлечь обобщения Фюхтбауэра и Мюллера, где выделение обстановок проводиться на уровне фациальных групп – континентальная, морская, переходная [4, 5]. В литологии существуют различные способы, позволяющие разделить осадки по фракционному составу и выделить различные фации – например, генетические и динамогенетические диаграммы Г. Фридмана, Р. Пассеги, Л.Б. Рухина, Г.Ф. Рожкова и других [6, 7].

Одной из относительно простых является диаграмма К. Бьёрликке, которая основана на разных соотношениях отсортированности и характере асимметрии распределения фракций песчано-алевритовых пород. Результатами исследований установлено, что прибрежные морские или озерные песчаные отложения характеризуются отрицательной асимметрией, в то время как речные и эоловые, обладают положительной асимметрией, и мода распределения располагается в области мелкозернистых фракций [8, 9].

Наиболее удовлетворительные результаты в определении генезиса современных осадков были получены на динамо-генетических диаграммах Р. Пассеги и Г.Ф. Рожкова. Несмотря на различный подход к определению условий седиментации, результаты, полученные на этих двух диаграммах для водной среды седиментации, оказались во многом сходными [10].

Динамическая диаграмма С–М, разработанная Р. Пассеги, учитывает способ транспортировки кластического материала качением частиц, сальтацией, переносом в виде градационной или однородной суспензии. Транспортировка крупно- и тонкозернистых фракций происходит независимо. Результаты анализов различных осадков на диаграмме С–М формируют сложную фигуру, которая была разделена точками N–S на сегменты, отвечающие определенным условиям седиментации [11].

Динамогенетическая диаграмма Г.Ф. Рожкова основана на принципе различной по интенсивности механической дифференциации песчано-алевритовых частиц в различных фациях. Это явление в природе связано также с различными способами перемещения обломочных частиц различного размера и в основном определяется энергетическими уровнями динамических сил среды переноса и седиментации [10].

Важную роль в генетической интерпретации играют аутигенные минералы, являющиеся индикаторами определенных сред осадконакопления. Например, Д. Голдсмит с коллегами выяснил фазовые отношения в системе Ca-Mg-Fe-Mn-CO<sub>2</sub>, помогающие определить условия осадкообразования. Так, на осаждение кальцита и доломита оказывает влияние рН среды, тогда как образование карбонатов Fe и Mn дополнительно зависит от окислительно-восстановительного баланса среды осаждения. Поэтому они связывают причину образования сидерита с обстановкой, характерной для застойных бассейнов или участков, подвергающихся действию приливов и отливов, а также эстуариев, для которых характерна высокая продуктивность органического вещества [12].

Таким образом, проанализировав современные подходы к определению генезиса по данным гранулометрического и минералогического анализов, можно сделать вывод о том, что разные обстановки осадконакопления могут иметь схожие характеристики, при этом совместное использование существующих методов гранулометрических исследований позволяет однозначно решить некоторые вопросы фациального анализа. В рассматриваемой работе предлагается комплексное использование методов по следующей схеме:

- обобщенное определение обстановки, по Фюхтбауэру и Мюллеру [4, 5];
- определение генезиса отложений по соотношению отсортированности и особенностям асимметрии (диаграмма К. Бьёрликке);
- определение условий седиментации по соотношению асимметрии и эксцесса (динамогенетическая диаграмма Г.Ф. Рожкова);
- определение фациальной обстановки по способу переноса обломочных частиц в водной среде (генетическая диаграмма Р. Пассеги);
- анализ состава аутигенных минералов, присутствующих в породах.

При таких комплексных исследованиях каждым последующим методом уточняются условия осадконакопления, что позволяет более объективно определять условия формирования осадка.

Апробация предлагаемой методики проведена на верхне-среднеюрских отложениях Ем-Еговской площади Красноленинского месторождения (Западная Сибирь).

Основная продуктивность связана с пластами тюменской свиты, где породы-коллекторы (пласты ЮК<sub>2-5</sub>) представлены песчано-алевритовыми разностями с подчиненными по мощности прослоями глин. Песчаники мелкозернистые, алевритистые с преобладающей песчаной (0,12–0,30 мм) и алевритовой (0,05–0,10 мм) размерности [13].

Низкие фильтрационно-емкостные свойства продуктивных песчаников обусловлены рядом причин. Главной, вероятно, является высокая степень их уплотненности и преобразованности эпигенетическими процессами. Широкое развитие аутигенных и эпигенетических карбонатных минералов, в первую очередь сидерита, и их присутствие в поровом пространстве также значительно ухудшает коллекторские свойства песчаников и особенно алевролитов. Тот же отрицательный эффект на фильтрационно-емкостные свойства в рассматриваемых породах-коллекторах оказывает присутствие высокого содержания мелкоалевритовой и глинистой фракций.

## Гранулометрический и минералогический анализы пластов ЮК<sub>2-5</sub> Ем-Еговского месторождения

В процессе работы были обработаны и проанализированы результаты гранулометрического анализа 208 образцов пластов ЮК<sub>2-5</sub> тюменской свиты, отобранных из 7 скважин Ем-Еговского месторождения, но в качестве примера в статье приведены результаты по скважине 1819 [14].

Гранулометрический состав породы-коллектора определен ООО «Сибгеоцентр» двумя методами:
во-первых, в прозрачных петрографических шлифах и, во-вторых, механическим ситовым (до фракции 0,05 мм) и отмучиванием пипеточным (более мелкие фракции) методами. Следует отметить, что гранулометрический анализ образцов, отобранных из юрских отложений, имеет большую достоверность по данным исследований в шлифах, чем механическим и пипеточным методами, так как песчано-алевритовые породы юрского возраста настолько уплотнены и прочно сцементированы, что с трудом разделяются на зерна механическим способом [15].

В качестве начального этапа графической обработки гранулометрического состава были построены гистограммы гранулометрического состава для изучения и иллюстрации изменения характера пород по разрезу. Затем строились кумулятивные кривые, которые важны как для графического изображения аналитических данных, так и для определения ряда параметров, характеризующих структуру породы (рис. 1).

Рассчитаны основные гранулометрические характеристики по образцам: средний размер частиц  $(X_{cp})$ , медиана (Md), параметр асимметрии (A), мера эксцесса (E), стандартное отклонение (коэффициент сортировки  $S_0$ ).

Средний размер определялся по формуле (1) [10]:

$$X_{cp} = \frac{(\emptyset 16 + \emptyset 50 + \emptyset 84)}{3}.$$
 (1)

Коэффициент сортировки зерен рассчитывался по формуле (2) [16]:



 $S_0 = \sqrt{\frac{Q_3}{Q_1}}.$  (2)

Асимметрия вычислялся по формуле (3) [10]:

$$a = \frac{\emptyset 16 + \emptyset 84 - 2 * \emptyset 50}{2 * (\emptyset 84 + \emptyset 16)} + \frac{\emptyset 5 + \emptyset 95 - 2 * \emptyset 50}{2 * (\emptyset 95 - \emptyset 5)}.$$
 (3)

Эксцесс определялся по формуле (4) [10]:

$$\tau = \frac{\emptyset 95 - \emptyset 5}{2,44 * (\emptyset 75 - \emptyset 25)}.$$
 (4)

Рассмотрим в качестве примера результаты, полученные для образцов из скважины 1819 Ем-Еговского месторождения (таблица).

**Таблица.** Основные гранулометрические характеристики (скважина 1819 Ем-Еговского месторождения)

 
 Table.
 The main granulometric features (well 1819 of Em-Egovskoe field)

N≗ oбp. Sample	Глубина, м Depth, m	Литология Lithology	X <sub>cp</sub>	S <sub>0</sub>	Md, мм (mm)	A	E	
27	2259,65	Алевритистая глина Silty clay	0,08	1,85	0,088	0,024	0,733	
38	2266,25	Песчанистый алевролит Sandy silstone	0,11	1,40	0,110	0,165	1,004	
39	2266,95		0,10	1,46	0,093	-0,102	0,997	
40	2267,20	Глинистый	0,09	1,53	0,095	0,143	0,856	
41	2267,95	алевролит	0,09	1,53	0,098	0,193	0,820	
42	2268,07	Clayey Siltstone	0,08	1,58	0,090	-0,001	0,961	
43	2268,86		0,09	1,55	0,090	-0,007	0,985	
45	2270,90	Сидеритово- алевритистая глина Sideritic-silty clay	_	_	-	-	_	

**Рис. 1.** Кумулятивная кривая и гистограмма распределения зерен по фракциям для скважины 1819 Ем-Еговского месторождения (образец № 38)

Fig. 1. Cumulative curve and histogram of grain fraction distribution for the well 1819 of Em-Egovskoe field (sample no. 38)

Следующим этапом является анализ полученных данных по методике, описанной выше.

Согласно обобщениям Фюхтбауэра и Мюллера, исследуемые породы в основном были сформированы в речной обстановке осадконакопления (русло и прирусловые отмели), так как сортировка в основном >1,2; асимметрия <1.

По соотношению отсортированности к асимметрии (по К. Бьёрликке) изучаемые породы относятся к турбидитам (рис. 2).



<u>Отложения</u>: I – пляжевые; II – золовые; III – речные; IV – турбидиты.

- **Рис. 2.** Соотношение отсортированности к асимметрии в обломочных отложениях различных обстановок для скважины 1819 Ем-Еговского месторождения (по К. Бьёрликке, 1989 г.)
- **Fig. 2.** Sorting asymmetry ratio in clastic sediments of various environments for the well 1819 of Em-Egovskoe field (by K. Berlikke diagram)

При этом когда говорят о турбидитах, способ их накопления понимается по-разному: либо как результат перемещения береговой линии и изменения глубины места седиментации, происходивших на относительно мелководном (не более 200 м) шельфе, либо как результат осаждения этих образований из мутьевых потоков в нижней части и у подножия континентального подводного склона в относительно глубоководной (1200 м и более) части бассейна седиментации [17]. Поэтому необходимо провести дальнейшее уточнение генезиса осадков.

Следующим шагом является построение и анализ динамогенетических диаграмм Г.Ф. Рожкова и Р. Пассеги (рис. 3, 4).

Из анализа расположения точек на диаграмме Г.Ф. Рожкова следует, что часть образцов попала в область прибрежно-морских фаций (поле VII, нижняя часть), а другая – в область прибрежной фации огромных открытых акваторий (поле VIII). На диаграмме Р. Пассеги образцы попали в область речных отложений (вторичный канал).

Ассоциация аутигенных минералов – каолинит+сидерит+пирит – свидетельствует в пользу переходных условий осадконакопления. Так, преобладание глинистой составляющей в качестве каолинита указывает на континентальную обстановку формирования, но следует отметить и значительное содержание хлорита и смешанно-слойных образований (ССО), которые говорят о морских условиях. Большое содержание сидерита является показателем континентальной или прибрежноморской обстановки.

Необходимо также обратить внимание на наличие в осадке одновременно как обломков древесины, отпечатков листьев, корней растений, указывающих на континентальный режим осадконакопления, так и оолитовых известняков, характерных для мелководных прибрежных участков с высокой турбулентностью течений [5], и ростров белемнитов, наличие которых может быть связано с процессами их переотложения в условиях морского побережья. Такое совместное присутствие подтверждает переходную обстановку седиментации, в которой выделяют сообщество приливно-отливных равнин и дельтовых комплексов. По особенностям строения дельты разделяются на приливные (эстуариевые), волновые (лопастные) и речные (выдвигающиеся).

#### Заключение

Согласно предложенной методике, условия осадконакопления можно наиболее полно соотнести с условиями, характерными для эстуариев. Именно эстуарий может объединить столь неоднозначные результаты, характерные для различных фаций.

В целом эстуарий – это участок совместного влияния реки и моря, где кластический материал поставляется, с одной стороны, рекой, а с другой, – со стороны моря приливным течениям и частично течениям, связанным с волнением моря, что подтверждается областью прибрежно-морских условий на диаграмме Г.Ф. Рожкова. Благодаря этому в осадках присутствуют как корни растений, так и привнесенные обломки белемнитов. Следует также отметить, что в эстуариях осаждаются главным образом пелитовые отложения (прежде всего глины) и пески в различном соотношении в зависимости от условий [18]. Из таблицы видно, что изучаемый интервал сложен алевролитом.

Приливно-отливные каналы и дельтовые протоки в пределах приливно-отливных равнин и эстуариев формируют условия осадконакопления, аналогичные обстановкам речных русел [18]. Этим можно объяснить результат, полученный по обобщениям Фюхтбауэра и Мюллера, а также наличие образцов в области вторичных каналов на генетической диаграмме Р. Пассеги.

Поверхностные воды нередко содержат растворенные вещества в виде коллоидов. При проникновении таких коллоидных растворов в морские бассейны происходит разрушение коллоидов морской водой, которая является электролитом. Таким образом, происходит коагуляция коллоидов, а затем они опускаются на дно, давая начало морским осадкам. В виде таких коллоидно-хемогенных осадков могут накапливаться гидроксиды Fe, Mn, Al. Но самыми неустойчивыми оказываются коллоиды гидроксидов железа, они коагулируют непосредственно при впадении реки в море [19]. Это объясняет наличие сидерита в рассматриваемых образцах.



<u>Поля</u>: I – застойные условия седиментации на дне акваторий различных глубин – морские фации. II – донные течения или мутьевые потоки – морские фации; гидромеханическое или физическое разрушение магматических пород, эрозия горных пород морского происхождения – континентальные фации областей сноса, коры выветривания. III– слабые, преимущественно речные течения – континентальные речные фации. IV– сильные речные или вдольбереговые течения – континентальные речные фации. V– выход волн на мелководье, сильные вдольбереговые течения, накат волн – прибрежно-морские фации, континентальная микрофация пляжей больших равнинных рек. VI – выход волн на мелководье, сильный накат волн – верхняя половина участка, эоловая обработка песков морских пляжей – нижняя половина участка (микрофация береговых дюн); в целом, – фация побережья акваторий вблизи береговой черты. VII – золовая переработка речных осадков – верхняя половина прямоугольника – континентальная фация пустынь (континентальные дюны); нижняя правая четверть прямоугольника – волновые процессы на мелководье, нейтральная полоса побережья, – прибрежно-морская фация. VIII – выход волн на мелководье, мощный накат-прибой, скорость динамической пересортировки превышает скорость привноса обломочного материала – прибрежная фация огромных открытых акваторий.

Рис. 3. Динамогенетическая диаграмма Г.Ф. Рожкова для скважины 1819 Ем-Еговского месторождения

Fig. 3. Dynamic-genetic diagram of G.F. Rozhkov for the well 1819 of Em-Egovskoe field



**Рис. 4.** Генетическая диаграмма Р. Пассега для определения способа переноса обломочных частиц в водной среде (скважина 1819 Ем-Еговского месторождения)

Fig. 4. Genetic diagram of R. Passegi to determine the method of fragmental particle transfer in aqueous medium (the well 1819 of Em-Egovskoe field)

Еще одним результатом анализа данных является принадлежность пород к турбидитам по диаграмме К. Бьёрликке. Учитывая, что на осаждение материала в эстуарии существенное влияние оказывают морские приливы и отливы, течения, связанные с приливами, могут характеризоваться различной скоростью. В общем, скорость приливных течений уменьшается от выхода к верхней части эстуария. Как правило, сила течений, связанных с отливом, больше, чем сила течений прилива. Наличие приливов и отливов создает периодически изменяющиеся условия осаждения [18]. Когда соприкасаются две массы воды различной плотности,

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Романовский С.И. Седиментологические основы литологии. Л.: Недра, 1977. – 408 с.
- Рухин Л.Б. Гранулометрический анализ песков. Л.: ЛГУ, 1947. – 213 с.
- Логвиненко Н.В., Орлова Л.В. Образование и изменение осадочных пород на континенте и в океане. Л.: Недра, 1987. 237 с.
- Крашенинников Г.Ф., Волкова А.Н., Иванова Н.В. Учение о фациях с основами литологии. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 214 с.
- Рейнек Г.-Э., Сингх И.Б. Обстановки терригенного осадконакопления (с рассмотрением терригенных кластических осадков). – М.: Недра, 1981. – 439 с.
- Рединг Х.Г. Обстановки осадконакопления и фации. М.: Мир, 1990. – 352 с.
- Вакуленко Л.Г., Предтеченская Е.А., Чернова Л.С. Опыт применения гранулометрического анализа для реконструкции условий формирования песчаников продуктивных пластов васюганского горизонта (Западная Сибирь) // Литосфера. – 2003. – № 3. – С. 99–108.
- Кузнецов В.Г. Литология. Осадочные горные породы и их изучение. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. 511 с.
- Селли Р.Ч. Древние обстановки осадконакопления. М.: Недра, 1989. – 294 с.
- Методы палеогеографических реконструкций (при поисках залежей нефти и газа) / В.А. Гроссгейм, О.В. Бескровная, И.Л. Геращенко и др. – Л.: Недра, 1984. – 271 с.
- Bull W.B. Relation of textural (CM) patterns to depositional environment of alluvial-fan deposits // Journal of Sedimentary Petrology. 1962. V. 32. № 2. P. 211-216.

водная масса более высокой плотности имеет тенденцию течь и распространяться ниже менее тяжелой разновидности. Такие плотностные течения хорошо известны в океане, где они обусловлены различием температур и солености. Подобным же образом мутные, обогащенные взвесью слои высокой плотности могут опускаться вниз и перемещаться ниже чистой воды, обладающей более низкой плотностью [5]. Поэтому в эстуариях происходит латеральное и вертикальное перемешивание вод [20], т. е. столкновение двух разнонаправленных динамических потоков и выпадение осадка, характеристика которого близка к турбидитам.

Таким образом, полученные результаты определения генезиса по совокупности гранулометрических и минералогических исследований могут говорить о формировании изучаемых отложении в условиях эстуария.

Необходимо отметить, что все описанные в работе методы определения генезиса осадков по данным гранулометрических исследований не дают четкой диагностики фациальной обстановки осадконакопления, а позволяют только разграничить осадки, сформированные в морском бассейне, на континенте или в переходной зоне. Для более точного определения фаций необходимо провести комплексное исследование изучаемой территории с подбором седиментационной модели, основываясь не только на гранулометрическом анализе, но и привлекая дополнительные данные по керну (фаунистические, петрографические, текстурные и т. д.), ГИС (фациальный электрометрический анализ), ГДИС (фильтрационно-емкостные).

- Петтиджон Ф., Поттер П., Сивер Р. Пески и песчаники. М.: Мир, 1976. – 536 с.
- 13. Кудряшова Л.К. Изучение литолого-фациальной модели для увеличения нефтеотдачи залежи на примере песчаных пластов тюменской свиты Красноленинского месторождения // Развитие минерально-сырьевой базы Сибири: от В.А. Обручева, М.А. Усова, Н.Н. Урванцева до наших дней: матер. I Всеросс. геологической молодежной школы. – Томск: ТПУ, 2013. – С. 88–91.
- 14. Kudryashova L.K., Belozerov V.B. Definition of facies conditions by granulometric analysis on the example of horizons  $JK_{2-5}$  in Em-Egovskoe field (Western Siberia) // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2014. V. 21. 012012.
- Недоливко Н.М., Ежова А.В. Петрографические исследования терригенных и карбонатных пород-коллекторов. – Томск: ТПУ, 2011. – 172 с.
- 16. Япаскурт О.В. Литология. М.: ИЦ «Академия», 2008. 336 с.
- Маркевич П.В. «Турбидиты» и «флиш» без пояснений опасные термины // Вестник ДВО РАН. – 2004. – № 4. – С. 95–105.
- Седиментология / Р. Градзиньский, А. Костецкая, А. Радомский, Р. Унруг. М.: Недра, 1980. 640 с.
- Бакуменко И.Т. Минералообразующие процессы. Новосибирск: Новосибирский гос. ун-т, 2001. – 80 с.
- Лидер М.Р. Седиментология. Процессы и продукты. М.: Мир, 1986. – 439 с.

Поступила 20.07.2015 г.

#### UDC 552.578.2.061.4.08:539.215(571.1)

# GRANULOMETRIC ANALYSIS AS THE MAIN METHOD TO JUSTIFY THE FORMATION CONDITIONS OF RESERVOIRS JK<sub>2-5</sub> IN EM-EGOVSKOE FIELD (WESTERN SIBERIA)

## Lidiya K. Kudryashova,

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

The relevance of the discussed issue is caused by the increasing significance of the recoverable oil reserves in reservoirs of deep horizons. This requires more detailed study of their formation conditions. Granulometric and mineralogical investigations of terrigenous sediments allow obtaining the basic ideas on their sedimentation conditions. In this case, the combination of the existing methods enables to address some issues of facies analysis.

**The main aim** of the study is to define the facies sedimentation environment by granulometric and mineralogical investigations on the example of horizons  $JK_{2-5}$  in Em-Egovskoe area, Krasnoleninskoe field.

**The methods used in the study:** granulometric and mineralogical investigations: generalized description of the environment by Furchtbauer and Muller; definition of deposit genesis by sorting ratio and features of asymmetry (K. Berlikke diagram); determination of sedimentation conditions by asymmetry and excess ratio (G.F. Rozhkov dynamogenetic diagram); identification of the way to transfer clastic particles in aqueous environment (R. Passegi genetic diagram); authigenic mineral composition analysis in rocks.

**The results.** The author proposes a complex use of methods to determine the genesis by the granulometric and mineralogical analyzes according to the certain plan. According to this plan, the precipitation formation conditions were clarified by each subsequent method and this enables to determine more accurately sedimentation formation. Based on granulometric and mineralogical studies, the author made the conclusion that the sediments studied had been formed within the estuary. The results of the study show that the sedimentation conditions and similar particle granulometric distributions. The efficiency of the facies prediction can be enhanced only through the integrated analysis.

#### Key words:

Facies analysis, granulometric analysis, mineralogical analysis, genetic diagram, Krasnoleninskoe field, Tyumensk formation, estuary.

#### REFERENCES

- Romanovskiy P.I. Sedimentologicheskie osnovy litologii [Sedimentological basis of lithology]. Leningrad, Nedra Publ., 1977. 408 p.
- Rukhin L.B. Granulometricheskiy analiz peskov [Granulometric analysis of sands]. Leningrad, LGU Publ., 1947. 213 p.
- Logvinenko N.V., Orlova L.V. Obrazovanie i izmenenie osadochnykh porod na kontinente i v okeane [The formation and the change of sedimentary rocks on the continent and in the ocean]. Leningrad, Nedra Publ., 1987. 237 p.
- Krasheninnikov G.F., Volkova A.N., Ivanova N.V. Uchenie o fatsiyakh s osnovami litologii [Facies lithology with the basics]. Moscow, MSU Publ., 1988. 214 p.
- Reynek G.-E., Singkh I.B. Obstanovki terrigennogo osadkonakopleniya (s rassmotreniem terrigennykh klasticheskikh osadkov) [Depositional sedimentary environments (with reference to terrigenous clastics)]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 439 p.
- Reding Kh.G. Obstanovki osadkonakopleniya i fatsii [Depositional environment and facies]. Moscow, Mir Publ., 1990. 352 p.
- Vakulenko L.G., Predtechenskaya E.A., Chernova L.S. Opyt primeneniya granulometricheskogo analiza dlya rekonstruktsii usloviy formirovaniya peschanikov produktivnykh plastov vasyuganskogo gorizonta (Zapadnaya Sibir) [The experience of applying granulometric analysis for reconstruction of depositional paleoenvironment of the productive beds sandstones of the Vasugan horizon (West Siberian plate)]. *Litosfera*, 2003, no. 3, pp. 99–108.
- Kuznetsov V.G. Litologiya. Osadochnye gornye porody i ikh izuchenie [Lithology. Sedimentary rocks and their study]. Moscow, Nedra-Biznestsentr Publ., 2007. 511 p.
- Selley R.C. Drevnie obstanovki osadkonakopleniya [Ancient sedimentary environments]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 370 p.
- Grossgeym V.A., Beskrovnaya O.V., Gerashchenko I.L. Metody paleogeograficheskikh rekonstruktsiy (pri poiskakh zalezhey nefti i gaza) [Methods of paleogeographic reconstructions (in the search for oil and gas)]. Leningrad, Nedra Publ., 1984. 271 p.

- 11. Bull W.B. Relation of textural (CM) patterns to depositional environment of alluvial-fan deposits. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1962, vol. 32, no. 2, pp. 211–216.
- Pettidzhon F., Potter P., Siver R. Peski i peschaniki [Sands and sandstones]. Moscow, Mir Publ., 1976. 536 p.
- 13. Kudryashova L.K. Izuchenie litologo-fatsialnoy modeli dlya uvelicheniya nefteotdachi zalezhi na primere peschanykh plastov tyumenskoy svity Krasnoleninskogo mestorozhdeniya [Study of litho-facies model for oil recovery enhancement deposits on the example of the Tyumensk formation sands of Krasnoleninskoe field]. Razvitie mineralno-syrevoy bazy Sibiri: ot V.A. Obrucheva, M.A. Usova, N.N. Urvantseva do nashikh dney: Materialy I Vserossiyskoy geologicheskoy molodezhnoy shkoly [The development of the mineral resource base of Siberia from V.A. Obrucheva, M.A. Usov, N.N. Urvantseva to the present. Proc. I<sup>st</sup> All-Russia geological youth school]. Tomsk, 2013. pp. 88–91.
- Kudryashova L.K., Belozerov V.B. Definition of facies conditions by granulometric analysis on the example of horizons JK<sub>2-5</sub> in Em-Egovskoe field (Western Siberia). *IOP Conf. Ser.: Earth Envi*ron. Sci., 2014, vol. 21, 012012.
- Nedolivko N.M., Ezhova A.V. Petrograficheskie issledovaniya terrigennykh i karbonatnykh porod-kollektorov [Petrographic studies of clastic and carbonate reservoir rocks]. Tomsk, TPU Publ., 2011. 172 p.
- Yapaskurt O.V. Litologiya [Lithology]. Moscow, Akademiya Publ., 2008. 336 p.
- Markevich P.V. «Turbidity» i «flish» bez poyasneniy opasnye terminy [«Turbidities» and «flysch» without explanation – the dangerous terms]. Vestnik DVO RAN, 2004, no. 4, pp. 95–105.
- Gradzinskiy R., Kostetskaya A., Radomskiy A., Unrug R. Sedimentologiya [Sedimentology]. Moscow, Nedra Publ., 1980. 640 p.
- Bakumenko I.T. Mineraloobrazuyushchie protsessy [Mineralizing processes]. Novosibirsk, NSU Publ., 2001. 80 p.
- Lider M.R. Sedimentologiya. Protsessy i produkty [Sedimentology. Processes and Products]. Moscow, Mir Publ., 1986. 439 p.

Received: 20 July 2015.

УДК 539.232:543.429.23

# КИНЕТИКА УМЕНЬШЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПАРАМАГНИТНЫХ ЦЕНТРОВ ПРИ СТАРЕНИИ ПРОДУКТОВ ХИМИЧЕСКОЙ КАРБОНИЗАЦИИ ПОЛИВИНИЛИДЕНФТОРИДА

## Живулин Владимир Евгеньевич,

аспирант кафедры физики и методики обучения физике Челябинского государственного педагогического университета, Россия, 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69. E-mail: zhivulinve@mail.ru

### Злобина Наталья Александровна,

студентка физико-математического факультета Челябинского государственного педагогического университета, Россия, 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69. Е-mail: tasha558559@mail.ru

### Песин Леонид Абрамович,

д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры физики и методики обучения физике Челябинского государственного педагогического университета, Россия, 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69. E-mail: pesinla@mail.ru

**Актуальность работы.** Одной из перспективных задач, стоящих перед современной наукой, является синтез и исследования свойств низкоразмерных и наноразмерных материалов на основе углерода. Химическое дегидрофторирование поливинилиденфторида позволяет создать на его поверхности обогащённый углеродом слой. Цепи исходного полимера могут оказаться перспективным прекурсором для синтеза квазиодномерных (карбиноидных) структур. В результате отрыва от углеродного скелета атомов фтора и водорода происходит образование неспаренных электронов углерода, которые дают вклад в ЭПР-поглощение. Дезактивация образовавшихся парамагнитных центров может приводить к образованию протяженных фрагментов сопряженных двойных и тройных углерод-углеродных связей. Также нельзя исключить и другие механизмы дезактивации парамагнитных центров. Изучение кинетики разрушения парамагнитных центров в химически дегидрофторированном поливинилиденфториде несет важную информацию о процессе формирования карбиноподобного углерода. Теорерические расчеты предсказывают полупроводниковый тип проводимости карбиноподобного углерода, что представляет интерес для его применения в микро- и наноэлектронике. Ключевым моментом для дальнейшего практического использования является изучение стабильности физико-химических свойств нового углеродного материала при его долговременном хранении.

**Цель работы:** подробно изучить кинетику дезактивации парамагнитных центров при долговременном хранении химически дегидрофторированных производных поливинилиденфторида; выяснить влияние атмосферного воздуха на процесс дезактивации парамагнитных центров; на основе полученных данных выдвинуть предположения о механизмах дезактивации. **Метод исследования:** ЭПР-спектроскопия.

**Результаты:** Проведены долговременные измерения кинетики уменьшения ЭПР-поглощения синтезированных образцов, в том числе, в условиях ограниченного доступа воздуха и пониженного давления. Выявлено по меньшей мере четыре типа парамагнитных центров, отличающихся скоростями дезактивации. Кинетика процессов исчезновения парамагнитных центров может быть описана совокупностью реакций первого порядка. Установлено, что самые быстрые реакции происходят с участием атмосферного воздуха.

#### Ключевые слова:

Поливинилиденфторид (ПВДФ), электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), химическое дегидрфторирование, углерод, парамагнитный центр.

#### Введение

Актуальной научной проблемой является синтез и исследование свойств углеродных структур пониженной размерности, в том числе, содержащих цепочечные (карбиноидные) фрагменты [1–9]. Одним из наиболее перспективных для этих целей материалов является поливинилиденфторид (ПВДФ). К настоящему времени выявлены некоторые характерные свойства большого количества продуктов карбонизации ПВДФ [10-13]. Изучены и описаны закономерности, происходящие при химическом синтезе карбиноидов, проведена оценка глубины проникновения дегидрофторирующей смеси в частично кристаллическую плёнку ПВДФ, показано, что с увеличением продолжительности дегидрофторирования (ДГФ) доля обогащённого углеродом слоя увеличивается [14]. Проводимость карбонизованного слоя выше, чем у его полимерной основы [15]. Это может предоставить возможность синтеза проводящих или/и полупроводниковых наноплёнок на эластичной и прозрачной диэлектрической подложке для микро-, нано- и оптоэлектронных устройств. Проведённые нами предварительные эксперименты по изучению влияния термообработки на продукты химической карбонизации ПВДФ позволили выявить неизвестный ранее эффект скачкообразного многократного усиления сигнала ЭПР с изменением его параметров - ширины и положения линии поглощения, который свидетельствует об образовании нового парамагнитного углеродного вещества [16, 17]. Такая контролируемая магнитная активность даёт возможность ещё более расширить предполагаемую область практического применения продуктов частичной карбонизации ПВДФ.

Ключевым критерием возможности применения нового материала на практике является стабильность его физико-химических свойств в процессе эксплуатации и/или хранения. Ранее [18, 19] было обнаружено, что при старении частично дегидрофторированной химическим путём плёнки ПВДФ сигнал ЭПР изменяется. В данном исследовании проведено подробное изучение кинетики этого явления в течение различных достаточно продолжительных промежутков времени, прошедших после завершения химического синтеза, и в условиях различной доступности атмосферного воздуха к образцам.

#### Методика приготовления образцов

Методом химического ДГФ плёнок ПВДФ в течение различных промежутков времени синтезирована серия образцов с частично карбонизованными поверхностями. Исходным материалом служила частично кристаллическая пленка ПВДФ марки  $\Phi$ -2МЭ толщиной 60 мкм, предоставленная ОАО «Пластполимер» (г. Санкт-Петербург). Характерная форма полученного нами ранее ИК спектра [16] указывает на доминирование в исходной плёнке полярной b?-конформации полимерных цепей. Содержание кристаллической и аморфной составляющих приблизительно одинаково.

Дегидрофторирующая смесь состояла из 1 объёмной части насыщенного раствора едкого кали в этаноле и 9 объёмных частей химически чистого ацетона.

Из рулона исходной пленки ПВДФ вырезалась заготовка размерами 1010 мм. Все дальнейшие манипуляции с образцом осуществлялись при помощи нержавеющего пинцета. Перед погружением образца в дегидрофторирующую смесь образец промывался в течение 30 минут в ультразвуковой ванне попеременно в дистиллированной воде и ацетоне. При этом пинцет с образцом фиксировался штативом так, чтобы образец находился в центре ванны. После промывки образец перемещался в центр колбы с ДГФ смесью. Объём смеси составлял 200 мл, её перемешивания не производилось. Для помещения в кварцевую измерительную пробирку образец нарезался полосками шириной 1 мм и длиной 5 мм.

Спектры ЭПР регистрировались при помощи радиоспектрометра РЭ-1306 при комнатной температуре. Приготовленный образец помещался в кварцевую пробирку и резонатор ЭПР спектрометра и не вынимался из резонатора до конца эксперимента. Регистрация начиналась спустя 15 минут после изъятия образцов из смеси. При этом наиболее частые измерения производились в первый день после синтеза. Интервал времени между регистрацией спектров при этом составлял около 10 минут.

Проведены долговременные измерения кинетики уменьшения сигнала ЭПР поглощения синтезированных образцов, в том числе, в условиях ограниченного доступа воздуха и пониженного давления. Измерения производилось относительно сигнала ЭПР образца сравнения – монокристалла Cu-SO<sub>4</sub>, постоянно находящегося вместе с образцом в резонаторе. Монокристалл был ориентирован таким образом, чтобы сигналы от него и от исследуемого образца не накладывались друг на друга, но при этом их запись могла происходить одновременно. После записи спектра измерялась амплитуда сигналов образца и CuSO<sub>4</sub>, после чего вычислялось их отношение, которое, в свою очередь, нормировалось на массу образца. Масса образца измерялась при помощи аналитических весов ВЛР-20.

Для измерения концентрации парамагнитных центров (ПМЦ) и анализа кинетики её уменьшения использовали не интегральную интенсивность, а наиболее просто измеряемый параметр спектра – амплитуду сигнала ЭПР исследуемого образца, нормированную на амплитуду сигнала монокристалла Cu-SO<sub>4</sub> и массу образца. Для расчёта концентрации ПМЦ в образце сравнения и в каждом из исследуемых образцов использовался сертифицированный эталонный образец на основе MgO: Mn<sup>2+</sup> с количеством ПМЦ 5·10<sup>13</sup> (заводской № ОМ 005, сертификат калибровки № 04/910-2012). Количество ПМЦ в образце сравнения оказалась равным 1,85·10<sup>18</sup>. Все измерения проведены при комнатной температуре.

#### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Исходная пленка ПВДФ сигнала ЭПР не дает. После химического ДГФ регистрируется одиночная линия с g-фактором, равным 2,003, и шириной 7,4 Гс.

На рис. 1 представлены результаты измерений при атмосферном давлении и неограниченном доступе воздуха к образцу кинетики уменьшения концентрации ПМЦ трёх образцов, синтезированных химическим ДГФ в течение 1, 3 и 15 ч (данные обозначены соответственно треугольниками, кружками и квадратами).



Рис. 1. Зависимости концентрации ПМЦ от продолжительности хранения в трёх образцах, синтезированных химическим ДГФ в течение 1 (▲), 3 (○) и 15 (■) ч. Сплошными и штриховой линиями показаны модельные зависимости, параметры которых позволяют достичь наилучшего соответствия экспериментальным данным

Fig. 1. Dependences of paramagnetic center (PMC) on storage period in three samples, synthesized by chemical DHF during 1 (▲), 3 (○) and 15 (■) h. Model dependences, which parameters allow achieving the best correspondence to the experimental data, are marked with solid and dash lines

Для наглядности использован логарифмический масштаб для обеих координатных осей. Из рис. 1 следует, что с увеличением продолжительности синтеза происходит рост концентрации ПМЦ. Данный факт свидетельствует об увеличении количества неспаренных электронов, образующихся в результате реакции ДГФ. При хранении образцов в темноте в атмосфере воздуха происходит уменьшение сигнала ЭПР. Последний эффект может быть следствием дезактивации образовавшихся радикалов в результате их рекомбинации и образования кратных углерод-углеродных связей, либо в результате присоединения к неспаренному электрону молекул, содержащихся в воздухе, в частности, кислорода или водяного пара (гидроксильных групп) [20].

Уменьшение ЭПР поглощения имеет монотонный, но неравномерный характер. Для анализа кинетических кривых, характеризующих зависимость концентрации ПМЦ от продолжительности хранения, использовано сравнение экспериментальных данных с модельной зависимостью, получаемой интегрированием дифференциальных уравнений, описывающих элементарные акты дезактивации парамагнитных центров. Такой анализ продемонстрировал наличие в образцах по меньшей мере четырёх разных типов ПМЦ. Три из них отличаются скоростями дезактивации. Четвёртый тип ПМЦ чрезвычайно стабилен. Если предположить, что превращения ПМЦ первых трёх типов являются реакциями первого порядка:

### -dN = kNdt,

то соответствующая модельная зависимость удовлетворительно описывает экспериментальную, как это видно из рис. 1. Тем не менее, достаточно большой разброс экспериментальных данных не исключает возможности их описания реакциями второго порядка, характерными для процесса рекомбинации радикалов:

#### $-dN=kN^{2}dt.$

Для определения кинетических параметров мы ограничились первым предположением. Таким образом, модельные зависимости I=f(t) являются суперпозициями трёх экспонент и одной константы. Параметрами каждой из экспонент являются величины концентрации ПМЦ каждого типа  $I_{0i}$  в начальный момент времени и вероятность  $k_i$  дезактивации соответствующего центра за единицу времени:

$$I = I_{01}e^{-k_1t} + I_{02}e^{-k_2t} + I_{03}e^{-k_3t} + I_c.$$
(1)

Параметры уравнения (1), при которых экспериментальные точки и модельные зависимости наилучшим образом соответствуют друг другу, приведены в таблице. Определение параметров модельной кривой осуществлялась в два этапа. Сначала подгонка происходила визуально. Затем при помощи надстройки программы Excel «Поиск решения» производилась математическая подгонка методом наименьших квадратов. При этом компьютерная программа варьировала параметры  $k_i$ ,  $I_{0i}$  и  $I_c$  до достижения наименьшего среднеквадратичного отклонения. Малая интенсивность сигнала ЭПР образца, синтезированного в течение 1 ч, приводит к большой погрешности измерения вариаций парамагнетизма при хранении. Поэтому для их описания оказалось достаточно двух экспонент, а значения параметров, характеризующих соответствующую модельную зависимость, являются наименее надёжными. Отношения же параметров  $I_{01}$ ,  $I_{02}$ ,  $I_{03}$  и  $I_c$  для двух остальных модельных кривых близки. Эти отношения приведены в последней строке таблицы. Их величины показывают, что концентрация ПМЦ каждого из четырёх типов в образце с продолжительностью ДГФ 15 ч приблизительно в 1,3-2 раза превышает таковую в образце, синтезированном в течение 3 ч. Этот факт может свидетельствовать о том, что ПМЦ четырёх разных типов при различных продолжительностях химического синтеза образуются в пропорциональных количествах.

Таблица. Параметры модельных зависимостей, позволяющие достичь наилучшего соответствия экспериментальным данным

 
 Table.
 Parameters of model dependences, which allow achieving the best correspondence to the experimental data

Продолжитель- ность ДГФ, ч DHF duration, h	<i>l</i> <sub>01</sub> , 10 <sup>18</sup> спин/г (spin/g)	<i>k</i> <sub>1</sub> , 10 <sup>-2</sup> мин <sup>-1</sup> (min <sup>-1</sup> )	/ <sub>02</sub> , 10 <sup>18</sup> спин/г (spin/g)	k <sub>2</sub> , 10 <sup>-3</sup> мин <sup>-1</sup> (min <sup>-1</sup> )	<i>l</i> <sub>03</sub> , 10 <sup>18</sup> спин/г (spin/g)	k <sub>3</sub> , 10 <sup>-5</sup> мин <sup>-1</sup> (min <sup>-1</sup> )	<i>l</i> <sub>c</sub> , 10 <sup>18</sup> спин/г (spin/g)
1	1,1	0,54	1,2	~0,001	~0		~0
3	16,0	1,6	10,0	1,1	3,4	1,0	0,8
15	25,1	1,2	13,6	1,7	4,5	4,3	1,6
Отношение I <sub>15</sub> /I <sub>3</sub> I <sub>15</sub> /I <sub>3</sub> ratio	1,6		1,4		1,3		2,0

Близкие порядки величин параметров  $k_i$  с одинаковыми i для разных образцов дают основания считать, что при ДГФ различной продолжительности образуются одни и те же три типа ПМЦ, концентрации которых убывают при старении продуктов химической карбонизации ПВДФ.

Для выяснения влияния воздуха на процесс дезактивации были проведены специальные эксперименты с откачкой воздуха и, наоборот, с увеличением локальной концентрации воздуха в той области измерительной пробирки, где находился образец.

Механизм дезактивации ПМЦ оказался явно связан с взаимодействием парамагнитных центров с атмосферным воздухом. На рис. 2 приведены результаты экспериментов для образцов, синтезированных химическим ДГФ в течение 15 и 18 ч, полученные при их старении. Данные для первого из них уже были представлены на рис. 1, но для удобства визуального сравнения продублированы. К нему, как было указано выше, обеспечивался свободный доступ атмосферного воздуха. Второй был герметично запечатан в измерительной пробирке восковой пробкой. Пробка перед самым на-



Рис. 2. Зависимости концентрации ПМЦ от продолжительности старения двух образцов, синтезированных химическим ДГФ в течение 15 (□) и 18 (●) часов, соответственно, в условиях свободного и ограниченного восковой пробкой доступа атмосферного воздуха

Fig. 2. Dependences of PMC concentration on aging duration of two samples, synthesized by chemical DHF during 15 (□) and 18 (●) h, correspondingly, under conditions of free and restricted access of atmospheric air by a wax stopper



Рис. 3. Зависимость концентрации ПМЦ в образце, синтезированном химическим ДГФ в течение 15 ч, от продолжительности старения в условиях пониженного давления воздуха

**Fig. 3.** Dependences of PMC concentration in a sample, synthesized by chemical DHF during 15 h, on aging duration under lower pressure

чалом измерений была перемещена от открытого конца кварцевой пробирки в направлении закрытого конца почти до верхнего края образца, что увеличило локальную концентрацию воздуха в нижней области пробирки, где был расположен образец. Это привело, как это видно из рисунка, к существенно более быстрому начальному уменьшению концентрации ПМЦ с последующей резкой стабилизацией. Последний эффект скорее всего является следствием истощения запаса воздуха в той области пробирки, где был расположен второй образец.

Совершенно иной результат получен при откачке воздуха из пробирки до давления 0,2 Торр (рис. 3): амплитуда сигнала ЭПР поглощения образца, синтезированного также в течение 15 ч, практически не изменялась в течение 500 мин. При натекании в пробирку воздуха до 0,5 Торр концентрация ПМЦ уменьшается, однако значительно медленнее, чем в условиях свободного доступа воздуха при обычном атмосферном давлении. Результаты, представленные на рис. 2 и 3, доказывают определяющее воздействие молекул газов, содержащихся в воздухе (скорее всего, кислорода и гидроксильных групп [20]), на уменьшение концентрации ПМЦ, образующихся при дегидрофторировании ПВДФ.

Анализ спектров ЭПР показал, что образования пероксидных радикалов при воздействии химически ДГФ ПВДФ с атмосферным воздухом не происходит.

#### Заключение и выводы

Методом химического дегидрофторирования поливинилиденфторида синтезирована серия частично карбонизованных плёночных образцов. Увеличение продолжительности синтеза вызывает рост парамагнитного поглощения, отсутствующего в исходном полимере. При последующем старении образцов сигнал ЭПР уменьшается. Проведены долговременные измерения кинетики уменьшения ЭПР поглощения синтезированных образцов, в том числе, в условиях ограниченного доступа воздуха и пониженного давления. Выявлено по меньшей мере три типа парамагнитных центров, отличающихся скоростями дезактивации при старении продуктов химической карбонизации ПВДФ, а также один весьма устойчивый тип спиновых центров, концентрация которых практически не зависит от времени, прошедшего после завершения синтеза. Кинетика процессов дезактивации парамагнитных центров может быть описана совокупностью реакций первого порядка. Установлено, что самые быстрые реакции происходят с участием атмосферного воздуха.

Выражаем благодарность доценту кафедры радиофизики и электроники Челябинского государственного университета А.А. Федию за неоценимую помощь в ремонте и настройке радиоспектрометра РЭ–1306.

Работа выполнена в рамках государственного задания министерства образования и науки Российской федерации в сфере научной деятельности (НИР № 2531 «Синтез и свойства магнитоактивного слоя на поверхности пленки поливинилиденфторида (ПВДФ)»).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Heimann R.B., Evsyukov S.E., Kavan L. Carbyne and carbynoid structures. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999. – 446 p.
- Luo W., Windl W. First principles study of the structure and stability of carbynes // Carbon. – 2009. – V. 47. – P. 367–383.
- Природный монокристаллический ?-карбин / Т.Г. Шумилова, Ю.В. Данилова, М.В. Горбунов, С.И. Исаенко // Доклады Академии Наук. – 2011. – Т. 436. – Вып. 3. – С. 394–396.
- Шахова Й.В., Беленков Е.А., Структура карбиноидных нанотрубок и карбинофуллеренов // Физика твердого тела. – 2011. – Т. 53. – Вып. 11. – С. 2265–2272.
- Шахова И.В., Беленков Е.А., Моделирование процесса карбонизации СFH-полимеров // Вестник Челябинского государственного университета. – 2009. – Вып. 5. – № 24 (162). – С. 5–12.
- Шахова И.В., Беленков Е.А. Модельное исследование структуры карбиноидных материалов // Вестник Челябинского государственного университета. 2010. Вып. 7. № 12 (193). С. 33–40.
- Formation of carbynoid structures by chemical dehydrohalogenation of poly (vinylidene chloride). A <sup>13</sup>C solid-state NMR study / S.E. Evsyukov, S. Paasch, B. Thomas, R.B. Heimann // Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 1997. V. 101. № 5. P. 837-841.
- ESR and vibrational spectroscopy study on poly (vinylidene fluoride) membranes with alkaline treatment / Shichao Zhang, Juan Shen, Xinping Qiu, Dangsheng Wend, Wentao Zhu // Journal of Power Sources. - 2006. - V. 153. - P. 234-238.
- New nanocluster carbyne-based material synthesized under high pressure / S.V. Demishev, A.A. Pronin, N.E. Sluchanco, N.A. Samarin, V.V. Glushkov, A.G. Lyapin, M.V. Kondrin, V.V. Brazhkin, T.D. Varfolomeeva, S.V. Popova, H. Ohta // Physics of the Solid State. - 2002. - V. 44. - Iss. 4. - P. 585-588.
- Kinetics of PVDF ?lm degradation under electron bombardment / L.A. Pesin, V.M. Morilova, D.A. Zherebtsov, S.E. Evsyukov // Polymer Degradation and Stability. - 2013. - V. 98. - № 2. -P. 666-670.
- Study of poly (vinylidene fluoride) radiative modification using core level spectroscopy / M.M. Brzhezinskaya, V.M. Morilova, E.M. Baitinger, S.E. Evsyukov, L.A. Pesin // Polymer Degradation and Stability. - 2014. - V. 99. - № 1. - P. 176-179.
- Kinetics of radiation-induced degradation of CF<sub>2</sub>- and CF-groups in poly (vinylidene fluoride): Model refinement / A.L. Sidelnikova, V.P. Andreichuk, L.A. Pesin, S.E. Evsyukov, I.V. Gribov, N.A. Moskvina, V.L. Kuznetsov // Polymer Degradation and Stability. - 2014. - V. 110. - P. 308-311.

- In situ observation of the modification of carbon hybridization in poly (vinylidene fluoride) during XPS/XAES measurements / L.A. Pesin, I.V. Gribov, V.L. Kuznetsov, S.E. Evsyukov, N.A. Moskvina, I.G. Margamov // Chem. Phys. Lett. - 2003. -V. 372. - № 5. - P. 825-830.
- Кудрявцев Ю.П., Евсюков С.Е., Бабаев В.Г. Эффективная дегидрофторирующая система для поливинилиденфторида // Изв. АН СССР. Сер. хим. – 1992. – Вып. 5. – С. 1223–1225.
- 15. Особенности электронной эмиссии продуктов радиационной карбонизации поливинилиденфторида / Л.А. Песин, С.С. Чеботарев, А.М. Кувшинов, И.И. Беспаль, И.В. Грибов, Н.А. Москвина, В.Л. Кузнецов, С.Е. Евсюков, А.В. Вязовцев, Н.С. Кравец // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2010. – Вып. 3. – С. 37–44.
- 16. Влияние термической обработки на магнитную активность продуктов химической карбонизации поливинилиденфторида / В.Е. Живулин, Л.А. Песин, В.М. Морилова, О.В. Корякова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2014. – Т. 6. – Вып. 2. – С. 56–62.
- Влияние продолжительности изотермической выдержки на магнитные и структурные свойства продуктов химической карбонизации поливинилиденфторида / В.Е. Живулин, Л.А. Песин, О.А. Меженина, И.Н. Ковалев, Н.А. Злобина, М.А. Гаврилов, В.М. Морилова, О.В. Корякова // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 2. – С. 149–157.
- Влияние условий и продолжительности хранения на интенсивность сигнала ЭПР химически дегидрофторированных производных поливинилиденфторида / Н.А. Мавринская, А.В. Мавринский, М. Баумгартен, С.Е. Евсюков, Л.А. Песин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2008. Т. 122. Вып. 22. С. 89–91.
- Оптические свойства и ЭПР-поглощение химически дегидрофторированного поливинилиденфторида / Н.А. Мавринская, Л.А. Песин, М. Баумгартен, Е.М. Байтингер, А.В. Мавринский, С.Е. Евсюков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2008. – Т. 107. – Вып. 7. – С. 80–88.
- 20. Влияние одноосного растяжения поливинилиденфторида на молекулярный состав продуктов его химического дегидрофторирования / М.Н. Соколова, А.А. Волегов, Л.А. Песин, И.Г. Маргамов, С.Е. Евсюков, О.В. Корякова, В.А. Коччедыков, Е.А. Беленков, И.В. Шахова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2008. – Т. 107. – Вып. 10. – С. 99–104.

Поступила 01.09.2015 г.

UDC 539.232:543.429.23

# KINETICS OF PARAMAGNETIC CENTERS DECREASE AT AGEING OF CHEMICALLY CARBONIZED DERIVATIVES OF POLY VINYLIDENE FLUORIDE

## Vladimir E. Zhivulin,

Chelyabinsk State Pedagogical University, 69, Lenin Avenue, Chelyabinsk, 454080, Russia. E-mail: zhivulinve@mail.ru

### Natal'ya A. Zlobina,

Chelyabinsk State Pedagogical University, 69, Lenin Avenue, Chelyabinsk, 454080, Russia. E-mail: tasha558559@mail.ru

#### Leonid A. Pesin,

Chelyabinsk State Pedagogical University, 69, Lenin Avenue, Chelyabinsk, 454080, Russia. E-mail: pesinla@mail.ru

**Relevance of the work.** One of the future problems facing modern science is the synthesis and study of the properties of low-dimensional and nanoscale materials based on carbon. Chemical dehydrofluorination of poly vinylidene fluoride (PVDF) allows generating a carbon enriched layer on its surface. Chains of the original polymer may be a promising precursor for synthesis of quasi-1D (carbynoid) structures. Cleavage of fluorine and hydrogen atoms from a carbon skeleton results in formation of unpaired electrons, which contribute in electron spin resonance (ESR) absorption. Deactivation of the formed paramagnetic centers (PMC) can lead to formation of extensive fragments consisted of double and triple carbon-carbon bonds. Besides, one cannot exclude the possibility of other routes of paramagnetic centers deactivation. Studying the kinetics of paramagnetic centers deactivation in chemically dehydrofluorinated poly vinylidene fluoride may give the important information on carbynoid carbon synthesis. Theoretical calculations predict semiconducting type of conductivity for carbynoid carbon, which is of interest for its application in micro- and nanoelectronics. The key point for the further practical usage of a new carbon material is a stability of its physical and chemical properties during long-term storage.

**The aim** of the research is to study in details the deactivation kinetics of paramagnetic centers at long-term storage of chemically dehydrofluorinated poly vinylidene fluoride derivatives; to reveal the atmospheric air effect on paramagnetic centers deactivation. The received data may give ideas on the mechanism of paramagnetic centers deactivation.

#### Research method: ESR spectroscopy.

**Results.** The authors have carried out the long-term measurements of the kinetics of ESR absorption reduction of synthesized samples, including those with limited access to air and low pressure. At least four types of paramagnetic centers, differing in deactivation rates, were revealed. The kinetics of deactivation of paramagnetic centers can be described by a set of first-order reactions. It is found that the fastest reactions occur with the atmospheric air.

#### Key words:

Poly vinylidene fluoride (PVDF), electron spin resonance (ESR), chemical dehydrofluorination, carbon, paramagnetic center.

The authors give thanks to A.A. Fedy, the associate professor of the department of radio physics and electronics of the Chelyabinsk State Pedagogical University, for invaluable help in repairing and setting the radiospectrometer RE-1306.

The research was carried out within the State task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the field of scientific researches (R&D no. 2531 «Synthesis and features of magnetic layer on the poly vinylidene fluoride film surface»).

#### REFERENCES

- Heimann R.B., Evsyukov S.E., Kavan L. Carbyne and carbynoid structures. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1999. 446 p.
- Luo W., Windl W. First principles study of the structure and stability of carbynes. *Carbon*, 2009, vol. 47, pp. 367–383.
- Shumilova T.G., Danilova Yu.V., Gorbunov M.V., Isaenko S.I. Prirodnyy monokrictallicheskiy α-karbin [Natural Monocrystalline α-Carbyne]. Doklady Earth Sciences, 2011, vol. 436, Iss. 3, pp. 152–154.
- Belenkov E.A., Shakhova I.V. Struktura karbinoidnykh nanotrubok i karbinofullerenov [Structure of carbynoid nanotubes and carbinofullerenes]. *Physics of the Solid State*, 2011, vol. 53, Iss. 11, pp. 2265–2272.
- Shakhova I.V., Belenkov E.A. Modelirovanie protsessa karbonizatsii CFH-polimerov [Modeling of CFH-polymers carbonization]. *Vestnik Chelyabinskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, 2009, Iss. 5, no. 24 (162), pp. 5–12.
- 6. Shakhova I.V., Belenkov E.A. Modelnoe issledovanie struktury karbinoidnykh materialov [Model study of carbynoid materials].

Vestnik Chelyabinskogo Gosudarstvennogo Universiteta, 2010, Iss. 7, no. 12 (193), pp. 33-40.

- Evsyukov S.E., Paasch S., Thomas B., Heimann R.B. Formation of carbynoid structures by chemical dehydrohalogenation of poly (vinylidene chloride). A <sup>13</sup>C solid-state NMR study. *Ber. Bunsen*ges. *Phys. Chem.*, 1997, vol. 101, no. 5, pp. 837–841.
- Shichao Zhang, Juan Shen, Xinping Qiu, Dangsheng Wend, Wentao Zhu, ESR and vibrational spectroscopy study on poly (vinylidene fluoride) membranes with alkaline treatment. *Journal of power sources*, 2006, vol. 153, pp. 234–238.
- Demishev S.V., Pronin A.A., Sluchanco N.E., Samarin N.A., Glushkov V.V., Lyapin A.G., Kondrin M.V., Brazhkin V.V., Varfolomeeva T.D., Popova S.V., Ohta H. New nanocluster carbynebased material synthesized under high pressure. *Physics of the Solid State*, 2002, vol. 44, Iss. 4, pp. 585–588.
- Pesin L.A., Morilova V.M., Zherebtsov D.A., Evsyukov S.E. Kinetics of PVDF film degradation under electron bombardment. *Polymer Degradation and Stability*, 2013, vol. 98, no. 2, pp. 666–670.
- 11. Brzhezinskaya M.M., Morilova V.M., Baitinger E.M., Evsyukov S.E., Pesin L.A. Study of poly (vinylidene fluoride) radiative mo-

dification using core level spectroscopy. *Polymer Degradation and Stability*, 2014, vol. 99, no. 1, pp. 176–179.

- Sidelnikova A.L., Andreichuk V.P., Pesin L.A., Evsyukov S.E., Gribov I.V., Moskvina N.A., Kuznetsov V.L. Kinetics of radiation-induced degradation of CF<sub>2</sub>- and CF-groups in poly (vinylidene fluoride): Model refinement. *Polymer Degradation and Stability*, 2014, vol. 110, pp. 308–311.
- Pesin L.A., Gribov I.V., Kuznetsov V.L., Evsyukov S.E., Moskvina N.A., Margamov I.G. In situ observation of the modification of carbon hybridization in poly (vinylidene fluoride) during XPS/XAES measurements. *Chem. Phys. Lett.*, 2003, vol. 372, no. 5, pp. 825-830.
- Kudryavtsev Yu.P., Evsyukov S.E., Babaev V.G. Effeektivnaya degidroftoriruyushchay sistema dlya polivinilidenftorida [An efficient dehydrofluorinating system for poly (vinylidene fluoride)]. Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Seriya khimicheskaya – Reports of the Russian Academy of Sciences. Chemistry series, 1992, Iss. 5, pp. 1223–1225.
- Pesin L.A., Chebotaryov S.S., Kuvshinov A.M., Bespal I.I., Gribov I.V., Moskvina N.A., Kuznetsov V.L., Evsyukov S.E., Vyazovtsev A.V., Kravets N.S. Osobennosti elektronnoy emissii produktov radiatsionnoy karbonizatsii polivinilidenftorida [Electron emission features of the derivatives of radiation carbonization of poly (vinylidene fluoride)]. Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2010, vol. 4, no. 2, pp. 214–221.
- 16. Zhivulin V.E., Pesin L.A., Morilova V.M., Koryakova O.V. Vliyanie termicheskoy obrabotki na magnitnuyu aktivnost produktov khimicheskoy karbonizatsii polivinilidenftorida [Heat-treatment influence on magnetic activity of chemical polyvinylidenfluoride carbonification products]. Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo universiteta. Serya Matematika. Mekhanika. Fizika – Bulletin of the South Ural State University. Mathematics. Mechanics. Physics, 2014, vol. 6, no. 2, pp. 56–62.
- Zhivulin V.E., Pesin L.A., Mezhenina O.A., Kovalyov I.N., Zlobina N.A., Gavrilov M.A., Morilova V.M., Koryakova O.V. Vliyanie

prodolzhitelnosti izotermicheskoy vyderzhki na magnitnye i strykturnye svoystva produktov khimicheskoy karbonizatsii polivinilidenftorida [Influence of isothermal heat-treatment duration on magnetic and structural properties of chemically carbonized poly (vinyildene fluoride) derivatives]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 2, pp. 149–157.

- Mavrinskaya N.A., Mavrinskiy A.V., Baumgarten M., Baitinger E.M., Evsyukov S.E., Pesin L.A. Vliyanie usloviy i prodolzhitelnosti khraneniya na intensivnost signala EPR khimicheski degidroftorirovannykh proizvodnykh polivinilidenftorida [Influence of the conditions and period of storage of chemically dehydrofluorinated derivants of the poly (vinylidene fluoride) on electron paramagnetic resonance signal strength]. Vestnik Yuzhno-Yralskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of the South Ural State University. Series Mathematics. Physics. Chemistry, 2008, Iss. 11, no. 22 (122), pp. 89–91.
- Mavrinskaya N.A., Pesin L.A., Baumgarten M., Baitinger E.M., Mavrinskiy A.V., Evsyukov S.E, Opticheskie svoystva i EPR-pogloshchenie khimicheski degidroftorirovannogo polivinilidenftorida [Optical properties and ESR absorption of chemically dehydrofluorinated poly (vinylidene fluoride)]. Vestnik Yuzhno-Yralskog gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of the South Ural State University. Series Mathematics. Physics. Chemistry, 2008, Iss. 10, no. 7 (107), pp. 80–88.
- 20. Sokolova M.N., Volegov A.A., Pesin L.A., Margamov I.G., Evsyukov S.E., Koryakova O.V., Kochedykov V.A., Belenkov E.A., Shakhova I.V. Vliyanie odnoosnogo rastyazheniya polivinilidenftorida na molekulyarny sostav produktov ego khimicheskogo degidroftorirovaniya [Influence of poly (vinylidene fluoride) uniaxial tension on the molecular composition of its chemical products]. Vestnik Yuzhno-Yralskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of the South Ural State University. Series Mathematics. Physics. Chemistry, 2008, Iss. 10, no. 7 (107), pp. 99–104.

Received: 01 September 2015.

УДК 661.152.32

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ГИДРОСУЛЬФАТА КАЛИЯ

### Шевелева Ольга Геннадьевна,

аспирант каф. «Химические технологии» Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. E-mail: Olgatnv07@rambler.ru

### Рупчева Вера Александровна,

канд. техн. наук, доцент каф. «Химические технологии» Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. E-mail: Poilov@pstu.ru

### Пойлов Владимир Зотович,

д-р техн. наук, профессор, заведующий каф. «Химические технологии» Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. E-mail: Poilov@pstu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью получения комплексных сульфатных калийных удобрений, не содержащих в своем составе хлорид-иона, накопление которого в почве приводит к снижению урожайности и повышению уровня солености почвы.

**Цель работы:** установление кинетических зависимостей процесса нейтрализации гидросульфата калия с различным размером частиц аммиака в реакторе с кипящим и неподвижным слоем.

**Методы исследования:** теоретический анализ протекающих процессов, моделирование технологического процесса в лабораторных условиях, исследование изменения содержания серной кислоты в продукте от времени эксперимента посредством титрования продукта гидроксидом натрия, рентгенофазовый анализ продукта, полученного при нейтрализации, нахождение уравнения зависимости степени превращения от времени с помощью программы «Table Curve 2D».

**Результаты.** Проведен теоретический анализ возможных способов нейтрализации, исследован процесс нейтрализации гидросульфата калия газообразным аммиаком в аппарате с кипящим и неподвижным слоем. Получены уравнения изменения степени и скорости нейтрализации гидросульфата калия аммиаком с течением времени для размеров частиц гидросульфата калия 0,3, 0,6 и 1,2 мм.

**Выводы.** Установлено, что наиболее приемлемым нейтрализующем агентом является аммиак. Процесс нейтрализации гидросульфата калия газообразным аммиаком в аппарате с кипящем слоем следует проводить при линейной скорости движения газа 0,042 м/с. Конечным продуктом при нейтрализации KHSO<sub>4</sub> газообразным аммиаком в кипящем слое является смесь гидросульфата калия и аммония (KNH<sub>4</sub>H)<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> и кислого сульфата калия K<sub>5</sub>H<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>4</sub>. Использовать данное вещество в качестве удобрения нецелесообразно, поэтому требуется его донейтрализация при промывке продукта на фильтре. При проведении нейтрализации в неподвижном слое процесс тормозится и остаточное содержание серной кислоты в продукте составляет выше 8 %. Анализ зависимостей степени нейтрализации гидросульфата калия аммиаком от времени при проведении процесса в кипящем и неподвижном слое показал, что степень нейтрализации увеличивается, достигая максимального значения при длительности 20 минут, затем постепенно уменьшается при проведении процесса в кипящем слое, и резко падает при проведении нейтрализации в неподвижном слое.

#### Ключевые слова:

Сульфатные калийные удобрения, двойной сульфат калия и аммония, нейтрализация, аппарат кипящего слоя, гидросульфат калия.

Калийные удобрения, применяемые в сельском хозяйстве, подразделяют на хлоридсодержащие и сульфатные [1]. Основным хлоридсодержащим калийным удобрением является хлорид калия (KCl), к сульфатным удобрениям можно отнести калиймагнезию (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·MgSO<sub>4</sub>), шенит (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·MgSO<sub>4</sub>, 6H<sub>2</sub>O), леонит (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·MgSO<sub>4</sub>, 10, сульфат калия (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) [2]. Производство сульфатных калийных удобрений – это перспективное направление в развитии калийной промышленности. Такие удобрения применимы для растений, не переносящих избытка хлора, а также могут быть использованы для всех грунтов и при всех способах внесения удобрения в почву. Кроме того, накопление в почве хлорид-ионов снижает урожайность и повышает уровень солености почвы [3].

Известные способы получения сульфатных удобрений можно условно разделить на две группы. К первой группе относят методы получения сульфатных удобрений переработкой природного полиминерального сырья (галургические методы) [4–6]. Ко второй группе относят конверсионные методы, в которых хлорид калия или поташ применяют как калийсодержащее сырье, на которое воздействуют сульфатами натрия (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), магния (MgSO<sub>4</sub>), аммония ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) или серной кислотой (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) [7–11].

В данной работе рассмотрена технология получения сульфатных калийных удобрений конверсией хлорида калия серной кислотой. Взаимодействие хлорида калия и серной кислоты протекает по реакции [12]:

$$KCl+H_2SO_4=KHSO_4+HCl.$$
 (1)

Представленная реакция является эндотермической, поэтому проводить технологический процесс получения гидросульфата калия рекомендуется при повышенных температурах. На практике различают твердофазную и жидкофазную конверсию [13]. При твердофазной конверсии в качестве сырья используют кристаллический хлорид калия и концентрированную серную кислоту. Процесс проводят в печи при температурах выше 250 °С. Вариант термической конверсии очень энергоемкий. К тому же необходима дополнительная защита оборудования от высоких температур и агрессивной среды. Еще одним недостатком данной технологии является налипание реагентов и продуктов реакции на стенки оборудования, что значительно затрудняет процесс и приводит к быстрому износу оборудования [14].

При жидкофазной конверсии на кристаллический хлорид калия воздействуют серной кислотой с концентрацией 70 %, либо насыщенный раствор хлорида калия конвертируют концентрированной серной кислотой. Процесс проводят в реакторе при постоянном перемешивании при температурах 100–120 °С. В данной технологии получения сульфатных калийных удобрений промежуточным продуктом является гидросульфат калия КНSO<sub>4</sub>. Использовать данное вещество в качестве готового удобрения невозможно, так как оно имеет высокое содержание серной кислоты. Процесс перекристаллизации КНSO<sub>4</sub> в сульфат калия энергоемкий, протекает при температурах 600-700 °С. В связи с этим более целесообразно проводить нейтрализацию кислого сульфата калия различными реагентами, посредством которой возможно получить комплексные сульфатные калийные удобрения. Выбор нейтрализующего агента обусловлен составом конечного продукта [15].

Нейтрализацию гидросульфата калия можно проводить поташом (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) согласно уравнению реакции:

$$2KHSO_4 + K_2CO_3 = 2K_2SO_4 + CO_2 + H_2O.$$
 (2)

Поташ в качестве нейтрализующего агента применим в том случае, когда требуется получить сульфат калия в качестве конечного продукта. Однако данный способ связан с использованием дорогостоящего и дефицитного поташа, в связи с чем этот способ менее пригоден для использования в промышленности.

Возможно получение калийно-магниевых удобрений при нейтрализации гидросульфата калия магнезитом (MgCO<sub>3</sub>), которая протекает по реакции [16]:

 $2KHSO_4 + MgCO_3 = MgSO_4 \cdot K_2SO_4 + CO_2 + H_2O.$ (3)

Этот способ нейтрализации гидросульфата калия исследован в диссертационной работе В.В. Шестакова [17]. Однако в литературе практически отсутствуют данные по закономерностям протекания процесса нейтрализации гидросульфата калия газообразным аммиаком в аппарате с кипящим слоем и водным раствором аммиака. В связи с этим в представленной работе изучали процесс нейтрализации гидросульфата калия аммиаком, который протекает согласно реакции:

### $KHSO_4 + NH_3 = K (NH_4) SO_4.$ (4)

Для исследования использовали аммиак безводный сжиженный марки Б ОКП 21 8192 0100 с массовой долей аммиака не менее 99,6 % (ГОСТ 6221-90) [18], для промывки полученного продукта применяли водный раствор аммиака марки А ОКП 21 3325 0200 с массовой долей аммиака не менее 25 % (ГОСТ 9-92). Нейтрализацию гидросульфата калия газообразным аммиаком исследовали в цилиндрическом реакторе с перфорированной перегородкой, на которую насыпали гидросульфат калия, затем через слой гидросульфата калия пропускали аммиак, подаваемый из баллона при различных расходах. Расход аммиака замеряли посредством реометра. Процесс исследовали в двух режимах: в кипящем и фильтрующем (неподвижном) слое, в зависимости от высоты слоя, размеров частиц гидросульфата калия и расхода аммиака.

Как известно, неподвижный слой поглотителя газа переходит в кипящий, когда гидродинамическое давление потока уравновешивает силу тяжести, действующую на частицы поглотителя. При этом скорость газообразного агента называют скоростью псевдоожижения ( $\omega$ ). При дальнейшем увеличении скорости газа слой поглотителя расширяется при неизменном гидравлическом сопротивлении ( $\Delta P$ ). Если гидродинамическое давление потока превышает силу тяжести, частицы поглотителя начинают выноситься из слоя. Такое явление происходит при скорости газа, равной скорости уноса частиц ( $\omega$ "). Таким образом, для создания кипящего слоя в аппарате скорость газообразного агента должна находится в пределах:  $\omega' < \omega < \omega'$  [19].

В данной работе для определения скорости псевдоожижения и оптимальной скорости движения аммиака использовали зависимость гидравлического сопротивления от линейной скорости газа ( $\omega$ ), которую рассчитывали по формуле:

$$\omega = \frac{4F}{\delta d^2},$$

где F – расход аммиака, м³/с; d – диаметр аппарата, м.

Гидравлическое сопротивление слоя (?Р) определяли по формуле:

$$\Delta P = \rho(1 - \varepsilon)gH,$$

где  $\rho$  – плотность гидросульфата калия, кг/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon$  – порозность слоя; g – ускорение свободного падения, 9,8 м/с<sup>2</sup>; H – высота слоя, м.

Так как гидравлическое сопротивление решетки мало по сравнению с сопротивлением слоя и в течение экспериментов остается постоянным, в данных расчетах им можно пренебречь. В приближенных расчетах порозность слоя ( $\varepsilon$ ) можно рассчитать как отношение объема твердой фазы ( $V_0$ ) к объему слоя ( $V_c$ ), согласно нижеследующей формуле:

$$\varepsilon = \frac{V_{\rm c} - V_0}{V_0}$$

Объем твердой фазы находили, зная массы гидросульфата калия (*m*) по формуле:

$$V_0 = \frac{m}{\rho}.$$

Объем слоя вычисляли по нижеследующей формуле:

$$V_{\rm c} = H \frac{\pi d^2}{4}$$

Для построения зависимости гидравлического сопротивления слоя гидросульфата калия от скорости движения аммиака проводили эксперимент, в котором при различном расходе газа определяли высоту слоя поглотителя с помощью измерительной металлической линейки с пределом измерения 100 мм и ценой деления 1 мм. При исследовании использовали гидросульфат калия со следующим гранулометрическим составом: частицы с размером 1,2 мм – 25 мас. %, с размером 0,6 мм – 50 масю %, 0,3 мм – 25 мас. %. Результаты проведенных экспериментов и расчетов скорости движения газа и гидравлического сопротивления при различных расходах аммиака представлены в табл. 1.

Таблица 1.	Результаты расчета гидравлического сопротивле-
	ния слоя гидросульфата калия и скорости движе-
	ния газа при различном расходе аммиака

Results of calculation of hydraulic resistance of po-
tassium hydrogen sulfate layer and gas flow velocity
at different ammonia consumption

Расход аммиака, л/ч Ammonia consum- ption, I/h	Расход аммиака, м³/с Ammonia consum- ption, m³/s	Высота слоя, м Bed height, m	Скорость движе- ния газа, м/с Gas flow velocity, m/s	Порозность слоя Bed porosity	Гидравлическое сопротивление, П: Hydraulic resistan- ce, Ра	
20	5,4.10⁻⁵	0,03	0,004	0,66	448,6	
40	1,08.10-5	0,04	0,008 0,74		676,1	
60	1,62.10⁻⁵	0,05	0,013	0,79	903,7	
80	2,16.10-5	0,06	0,017	0,83	1131,3	
100	2,7.10-5		0,021			
120	3,24.10-5		0,026			
140	3,78.10-5		0,030			
160	4,32.10-5	0,07	0,034	0,85	1358,8	
180	4,86.10-5		0,039			
200	5,4.10-5	5,4.10-5				
210	5,67.10⁻⁵		0,045			

Как видно из значений, представленных в табл. 1, высота слоя гидросульфата калия и гидравлическое сопротивление постепенно увеличиваются, пока не достигнут постоянного значения при расходе аммиака 100 л/ч. На рис. 1 приведена зависимость гидравлического сопротивления слоя гидросульфата калия от скорости движения аммиака. При увеличении расхода аммиака выше 210 л/ч слой гидросульфата калия становится неоднородным, частицы гидросульфата калия интенсивно выбрасывает в пространство над его поверхностью.



**Рис. 1.** Зависимость гидравлического сопротивления слоя гидросульфата калия от скорости движения аммиака

*Fig. 1.* Dependence of hydraulic resistance of potassium hydrogen sulfate bed on ammonia flow velocity

При скорости движения аммиака менее 0,021 м/с гидравлическое сопротивление увеличивается с ростом скорости газа, при этом слой остается неподвижным. При дальнейшем увеличении скорости газа гидравлическое сопротивление остается постоянным, слой переходит в псевдоожиженное состояние. Таким образом, скорость 0,021 м/с является скоростью псевдоожижения. Интенсивность перемешивания частиц в кипящем слое характеризует число псевдоожижения (W), равное отношению рабочей скорости газа к скорости псевдоожжижения [19]. Наиболее интенсивному перемешиванию соответствует W=2, при дальнейшем росте W слой становится неоднородным, происходит прорыв крупных пузырей газа через слой и начинается интенсивное выбрасывание частиц в пространство над его поверхностью [20]. Поэтому процесс нейтрализации гидросульфата калия следует проводить при линейной скорости газообразного аммиака не менее 0,021 и не более 0,042 м/с.

В исследовании процесса нейтрализации использовали гидросульфат калия, содержащий 38 мас. % серной кислоты. Поскольку получаемое сульфатное удобрение должно быть полностью нейтральным, при проведении нейтрализации необходимо стремиться к полному удалению серной кислоты. В течение эксперимента каждые 15 минут отбирали пробы твердого продукта и определяли в нем остаточное содержание серной кислоты. Время проведения эксперимента составило 90 минут. Зависимости остаточного содержания серной кислоты в продукте от времени проведения нейтрализации в кипящем слое приведены на рис. 2.

Из анализа кривых на рис. З следует, что содержание серной кислоты в продукте нейтрализации снижается в течение часа, когда взаимодействие аммиака и гидросульфата калия протекает вблизи поверхности частицы гидросульфата калия, затем процесс нейтрализации существенно замедляется для всех размеров частиц и полной нейтрализации гидросульфата калия газообразным аммиаком не происходит. По истечении 90 минут от начала процесса содержание серной кислоты в продукте уменьшается до 0,8 мас. % для размера частиц KHSO<sub>4</sub> 0,3 мм, до 2 мас. % при размере 0,6 мм и до 4,5 мас. % для 1,2 мм. Таким образом, наиболее полно нейтрализация протекает при меньшем размере частиц гидросульфата калия.



Рис. 2. Зависимости остаточного содержания серной кислоты в продукте от времени проведения нейтрализации KHSO₄ в кипящем слое

Fig. 2. Dependence of residual content of sulfuric acid in the product on KHSO₄ neutralization time in fluidized bed

Рентгенофазовый анализ продукта (рис. 3), полученного при нейтрализации гидросульфата калия газообразным аммиаком в кипящем слое, показал, что в этом случае образуется смешанная соль – гидросульфат калия и аммония (KNH<sub>4</sub>H)<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> с примесью кислого сульфата калия K<sub>5</sub>H<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>4</sub>.



**Рис. 3.** Рентгенограмма продукта нейтрализации гидросульфата калия газообразным аммиаком

Fig. 3. X-ray pattern of potassium hydrogen sulfate product neutralization by gaseous ammonia

Гидросульфат калия и аммония с примесью кислого сульфата калия – соединение, имеющее кислую среду, поэтому использовать его в качестве удобрения невозможно. Экспериментально установлено, что полной донейтрализации гидросульфата калия можно добиться при введении дополнительной стадии промывки полученного продукта раствором аммиака на фильтре.

Полагая, что при медленном движении газа сквозь слой гидросульфата калия и увеличении времени соприкосновения взаимодействующих веществ нейтрализация будет протекать полнее, в данной работе также исследовали процесс нейтрализации в неподвижном (фильтрующем) слое гидросульфата калия (при линейной скорости движения аммиака 0,01 м/с, которая ниже скорости псевдоожижения). Результаты экспериментов по нейтрализации в неподвижном слое представлены на рис. 4.



Рис. 4. Зависимости остаточного содержания серной кислоты в продукте от времени проведения нейтрализации KHSO₄ в неподвижном слое

**Fig. 4.** Dependence of the residual content of sulfuric acid in the product on KHSO<sub>4</sub> neutralization time in fixed bed

Зависимости остаточного содержания серной кислоты в продукте нейтрализации, приведенные на рис. 4, показывают, что в неподвижном слое нейтрализация проходит не полностью. При этом процесс протекает в течение первых 45 минут, а затем содержание серной кислоты в продукте не изменяется и остается высоким. При размере частиц гидросульфата калия 0,3 мм конечное содержание серной кислоты в продукте составило **8,3** мас. %, при размере частиц **0,6** мм – **15,4** мас. %, а при размере 1,2 мм – 19,5 мас. %. Таким образом, остаточное содержание серной кислоты в продукте при различном размере частиц сильно отличается между собой. При этом содержание серной кислоты при нейтрализации гидросульфата калия в неподвижном слое значительно выше, чем в кипящем слое. При проведении нейтрализации в кипящем слое за счет интенсивного перемешивания улучшается диффузия молекул аммиака к поверхности гидросульфата калия, поэтому процесс протекает наиболее полно.

Взаимодействие аммиака и гидросульфата калия можно отнести к топохимическим реакциям, так как это гетерогенный процесс в котором участвует твердое исходное вещество и образуется твердый продукт. При этом реакция локализована на границе раздела между исходным гидросульфатом калия и твердым продуктом – двойным сульфатом калия. Поэтому скорость химической реакции будет определяться как числом зародышей, так и скоростью их роста. В представленной работе скорость химической реакции оценивали по изменению степени нейтрализации гидросульфата калия во времени [21]. Степень нейтрализации гидросульфата калия (*α*) рассчитывали по формуле:

$$a = \frac{C_0 - C}{C_0},$$

где  $C_0$  – начальное содержание серной кислоты в гидросульфате калия; C – остаточное содержание серной кислоты в гидросульфате калия в исследуемый промежуток времени.

По результатам расчетов были построены зависимости степени нейтрализации гидросульфата калия от времени при проведении процесса в кипящем и неподвижном слое, которые представлены на рис. 5 и 6 соответственно.



**Рис. 5.** Зависимость степени нейтрализации гидросульфата калия от времени при проведении процесса в кипящем слое

Fig. 5. Time dependence of potassium hydrogen sulfate neutralization degree in fluidized bed

Как видно на рис. 5, степень нейтрализации гидросульфата калия резко увеличивается в первые 20 минут протекания процесса, а затем практически не изменяется. Такой характер кривых свидетельствует о небольшом индукционном периоде реакции, в который образуются зародыши фазы твердого продукта реакции на поверхности частиц гидросульфата калия, - появляется реакционная поверхность раздела фаз. Затем реакционная поверхность раздела фаз растет за счет роста сформировавшихся зародышей новой фазы и за счет образования новых зародышей. В это время происходит интенсивный рост степени превращения. По мере развития поверхности раздела фаз растущие зародыши начинают объединяться [21]. Из-за отсутствия свободной поверхности образования новых зародышей практически не происходит. Объединение зародышей приводит к уменьшению реакционной поверхности раздела фаз и образованию сплошного слоя твердых продуктов, граница которого постепенно продвигается вглубь зерен гидросульфата калия. Степень превращения увеличивается медленно. При меньшем размере частиц гидросульфата калия степень нейтрализации выше, так как при этом больше реакционная поверхность.

При проведении процесса в неподвижном слое (рис. 6) степень нейтрализации также быстро увеличивается в первые 20 минут, как и в кипящем слое, а затем также практически не изменяется. Но значения степени превращения в идентичные интервалы времени в неподвижном слое ниже, чем в кипящем. Это можно объяснить тем, что при продвижении реакционной поверхности вглубь зерна гидросульфата калия затрудняется подвод молекул аммиака к зоне химической реакции. При этом чем больше размер частиц гидросульфата калия, тем степень нейтрализации ниже.



**Рис. 6.** Зависимость степени нейтрализации гидросульфата калия от времени при проведении процесса в неподвижном слое

Fig. 6. Time dependence of potassium hydrogen sulfate neutralization degree in fixed bed

Зависимости степени нейтрализации от времени в дифференциальной форме для различных размеров частиц при проведении процесса в кипящем и неподвижном слое обработаны в программе «Table Curve 2D». В результате было получено следующее уравнение зависимости степени нейтрализации от времени, схожее с уравнением Аврами, описывающим изменение степени превращения со временем при протекании топохимической реакции, в котором образование зародышей новой фазы происходит по экспоненциальному закону [21]:

$$a = \hat{E}(1 - e^{-t} + bt + ct^{2} + dt^{3}).$$
(1)

Коэффициенты уравнения 1 представлены в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициенты уравнения 1, вычисленные для проведения процесса в кипящем и неподвижном слое для различных размеров частиц гидросульфата калия

**Table 2.** Coefficients of the equation 1 for the process in fluidized and fixed beds for different size particles of potassium hydrogen sulfate

Проведение процесса нейтрализации в кипящем слое Neutralization in fluidized bed						
Размер частиц КНSO4 КНSO4 particle size	Коэффициенты в уравнении Coefficients in the equation					
Rinoo4 purificie size	K	b	С	d		
0,3	0,527	0,011	-0,00032	1,76.10-6		
0,6	0,407	0,009	-0,00039	1,48.10-6		
1,2	0,211	0,007	-0,00044	1,23.10-6		
Проведение процесса нейтрализации в неподвижном слое Neutralization in fixed bed						
Размер частиц КНSO4 КНSO4 particle size	Коэффициенты в уравнении Coefficients in the equation					
ranso <sub>4</sub> particle size	K	b	C	d		
0,3	0,383	0,008	-0,00037	1,57.10-6		
0,6	0,234	0,005	-0,00054	1,35.10-6		
1,2	0,135	0,003	-0,00068	1,04.10-6		

Адекватность полученных уравнений с коэффициентами в табл. 2 оценивали посредством множественного коэффициента детерминации. Во всех случаях коэффициенты детерминации R<sup>2</sup>>0,9992, следовательно, полученные уравнения адекватны.

При проведении процесса нейтрализации в неподвижном слое положительные коэффициенты в уравнении 1 имеют меньшее значение, а отрицательные – большее, чем в кипящем слое, вследствие чего уменьшается степень превращения. Также положительные коэффициенты уменьшаются, а отрицательные увеличиваются при увеличении размера частиц. Коэффициенты в уравнении 1 зависят от числа зародышей продукта реакции, поверхности реакционной зоны и от скорости диффузии молекул аммиака к поверхности раздела фаз.

Дифференцирование уравнения 1 позволило получить уравнение скорости процесса (2), представленное ниже:

$$\frac{da}{dt} = \hat{E}(e^{-t} + b + 2ct + 3dt^2).$$
 (2)

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

- Получение сульфата калия из гидросульфата процесс дорогостоящий, наиболее перспективно получать комплексные калийные сульфатные удобрения путем нейтрализации гидросульфата калия различными реагентами. При этом для получения калино-азотных сульфатных удобрений целесообразно использовать в качестве нейтрализующего агента аммиак.
- Нейтрализацию гидросульфата калия газообразным аммиаком следует проводить в реакто-

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Грабовенко В.А. Производство бесхлорных калийных удобрений. – Л.: Химия, 1980. – 256 с.
- Справочник по переработке минеральных солей и рассолов / под ред. И.Д. Соколова. – Л.: Химия, 1985. – 452 с.
- Кашкаров О.Д., Соколов И.Д. Технология калийных удобрений. – М.: Химия, 1978. – 354 с.
- Вишняков А.К., Шакирзянова Д.Р., Габдрахманова В.И. Полигалитовые породы – новое сырье для производства дефицитныхсульфатных калийно-магниевых удобрений // Разведка и охрана недр. – 2007. – № 11. – С. 29–33.
- Хузиахметов Р.Х., Ахметов Т.Г., Хуснутдинов В.А. Технология бесхлоридных комплексных удобрений и оценка их агрохимической эффективности // Вестник Казанского технологического университета. – 2009. – № 3. – С. 21–31.
- Способ получения шенита: пат. 2373151 Рос. Федерация № 2007143342/15; заявл. 22.11.2007; опубл. 20.11.2009. Бюл. № 18. – 11 с.
- Химический процесс получения хлоровода и бесхлоридных комплексных калийных сульфатных удобрений или сульфатов других металлов: пат. США № 887776; заявл. 13.09.2010; опубл. 02.08.2011.
- Томасзевска М. Предварительное исследование конверсии хлорида калия в сульфат калия, используя мембранный реактор // Журнал мембранной науки. – 2008. – № 5. – С. 14–18.
- 9. Способ получения сульфата калия: пат. 2144501 Рос. Федерация № 98117919/12; заявл. 01.10.1998; опубл. 20.01.2000. Бюл. № 6. 5 с.

ре с кипящим слоем при линейной скорости аммиака 0,042 м/c, что обеспечивает интенсивное перемешивание частиц в слое. Дальнейшее увеличение расхода аммиака приводит к неоднородности слоя, происходит прорыв крупных пузырей газа через слой и начинается интенсивное выбрасывание частиц в пространство над его поверхностью.

- 3. Конечным продуктом нейтрализации гидросульфата калия газообразным аммиаком в кипящем слое является смесь гидросульфата калия и аммония (KNH<sub>4</sub>H)<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> и кислого сульфата калия K<sub>5</sub>H<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>4</sub>. Данный продукт имеет кислую среду и его невозможно использовать как удобрение. Поэтому необходима дополнительная стадия промывки кислых сульфатов калия и аммония раствором аммиака.
- 4. Нейтрализация гидросульфата калия газообразным аммиаком, в реакторе с неподвижным слоем при линейной скорости аммиака 0,01 м/с проходит не полностью. Процесс протекает в течение первых 45 минут, а затем содержание серной кислоты в продукте не изменяется с течением времени. Этот способ нейтрализации не рекомендован для дальнейшего использования.
- 5. Степень нейтрализации увеличивается, достигая максимального значения при длительности 20 минут, затем постепенно уменьшается при проведении процесса в кипящем слое, и резко падает при проведении нейтрализации в неподвижном слое. Получено уравнение зависимости степени нейтрализации от времени, и на его основе выведено уравнение скорости химической реакции.
- Метод получения сульфата калия: пат. США № 6315976; заявл. 14.06.1999; опубл. 13.09.2001.
- Исследование стадии получения кислого сульфата калия в технологии производства сульфатных калийных удобрений / О.Г. Стефанцова, А.Б. Ахунова, В.А. Рупчева, В.З. Пойлов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2014. – № 1. – С. 75–83.
- Процесс для получения сульфатных калийных удобрений и сульфатов других металлов: пат. США № 6365122; заявл. 22.06.1998; опубл. 02.04.2002.
- Получение гидросульфата калия из циклонной пыли хлорида калия и серной кислоты / А.Б. Ахунова, О.Г. Стефанцова, В.А. Рупчева, В.З. Пойлов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2014. – № 3. – С. 79–88.
- Способ конверсии хлорида металла в его сульфат: пат. Рос. Федерация № 2489502; заявл. 29.05.2012; опубл. 10.08.2013. Бюл. № 4. – 8 с.
- Метод получения сульфата калия из хлорида калия: пат. США № 8409542; заявл. 14.06.2011; опубл. 02.04.2013.
- Процесс получения сульфата калия и хлороводородной кислоты: пат. Япония № 2040109; заявл. 09.04.1991; опубл. 11.10.1991.
- Шестаков В.В. Технология получения бесхлоридных калийнофосфорного и калийно-магниевого удобрений на основе жидкофазной конверсии хлорида калия серной кислотой: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1990. – 15 с.

- Брудзь В.Г., Раковская В.А., Ускова Л.Е. Справочник показателей качества химических реактивов. – М.: Химия, 1968. – 992 с.
- Тимонин А.С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования. – Калуга: Изд-во Н.Бочкаревой, 2002. – 852 с.
- Альперт Л.З. Основы проектирования химических установок. М.: Высш. шк., 1989. 304 с.
- Стромберг А.Г., Семченко Д.П. Физическая химия. М.: Высш. шк., 1988. – 495 с.

Поступила 15.09.2015 г.

UDC 661.152.32

## STUDY OF POTASSIUM HYDROGENSULFATE NEUTRALIZATION

### Olga G. Sheveleva,

Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky Avenue, 614990, Perm, Russia. E-mail: Olgatnv07@rambler.ru

### Vera A. Rupcheva,

Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky Avenue, 614990, Perm, Russia. E-mail: Poilov@pstu.ru

### Vladimir Z. Poilov,

Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky Avenue, 614990, Perm, Russia. E-mail: Poilov@pstu.ru

The relevance of the research is caused by the necessity to obtain the complex potassium sulfate fertilizers, which not contain chloride ion. The accumulation of chloride ion in soil leads to lower yields and increases the soil salinity level.

**The main aim** of the work is to investigate potassium hydrogensulfate neutralization by ammonia in reactor with fluidized and fixed bed at different particle size; to establish the kinetic dependences of neutralization.

**The methods used in the study:** theoretical analysis of processes, modeling of technological process in laboratory conditions, study of changes in the content of sulfuric acid in product in time by titration of product with sodium hydroxide, X-ray analysis of product, obtained by neutralization, finding of conversion degree of equation depending on time using the program «Table Curve 2D».

**The results.** The authors have carried out the theoretical analysis of possible neutralizing ways and studied the hydrogen sulfate neutralization by ammonia gas in apparatus with fluidized and fixed bed. The equations of change in degree and rate of potassium hydrogensulfate neutralization by ammonia over time for particle sizes of potassium hydrogensulfate 0,3, 0,6 and 1,2 mm were obtained.

**The conclusions.** It was ascertained that the most acceptable neutralizing agent is ammonia. The potassium hydrogensulfate should be neutralized by ammonia gas in apparatus with fluidized bed at linear gas velocity of 0,042 m/s. The end product of neutralization KHSO<sub>4</sub> by ammonia gas in fluidized bed is the mixture of potassium and ammonium hydrogensulfate (KNH<sub>4</sub>H)<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> and potassium hydrogen sulfate K<sub>5</sub>H<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>4</sub>. It is not reasonable to use this substance as fertilizer, therefore, it requires additional neutralization by washing. The process is inhibited at neutralization in a fixed bed and residual sulfuric acid content in the product is higher than 8 %. The analysis of dependence of potassium hydrogensulfate neutralization degree on time in fluidized and fixed bed showed, that the neutralization degree increases, reaching a maximum at duration of 20 minutes, then it decreases gradually during the process in a fluidized bed, and it falls sharply during the neutralization in a fixed bed. The rate of chemical reactions in fluidized bed is determined by the size of reaction phase interface and it is limited by the formation and growth of reaction product nuclei, and limiting step in fixed bed is diffusion of ammonia molecules to the reaction zone.

#### Key words:

Sulfate potassium fertilizers, double potassium and ammonium sulfate, neutralization, apparatus with fluidized bed, potassium hydrogensulfate.

#### REFERENCES

- Grabovenko V.A. Proizvodstvo beskhloridnykh kaliynykh udobreniy [Production of the chlorate-free potassium fertilizers]. Leningrad, Khimiya Publ., 1980. 256 p
   Sokolov I.D. Spravochnik po pererabotke mineralnykh soley i ras-
- Sokolov I.D. Spravochnik po pererabotke mineralnykh soley i rassolov [Catalog on mineral salts and brine processing]. Leningrad, Khimiya Publ., 1985. 452 p
- Kashkarov O.D., Sokolov I.D. Tekhnologiya kaliynykh udobreniy [Technology of potassium fertilizers]. Moscow, Khimiya Publ., 1978. 354 p.
- Vishnyakov A.K., Shakirzyanova D.R., Gabdrakhmanova V.I. Poligalitovaya ruda – novoe syre dlya proizvodstva sulfatnykh

kaliyno-magnievykh udobreniy [Polyhalite ores is the new raw for producing sulphate potassium-magnesium fertilizer]. *Exploration and conservation of mineral resources*, 2007, no. 11. pp. 29–33.

- Khuziakhmetov R.Kh., Akhmetov T.G., Khusnutdinov V.A. Tekhnologiya beskhloridnykh kompleksnykh udobreniy i otsenka ikh agrokhimicheskoy effektivnosti [Technology of chloride-free complex fertilizers and estimation of their agrochemical efficiency]. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i bio tekhnologiya, 2009, no. 3, pp. 21–31.
- Safrygin Yu.A., Osipova G.V., Buksha Yu.V., Timofeev V.I. Sposob polucheniya shenita [The method of the schoenite obtain]. Patent RF, no. 2373151, 2009.

- Finkelshtein L. Khimicheskiy protsess polucheniya khlorovodoroda i beskhloridnykh kompleksnykh kaliynykh sulfatnykh udobreniy ili sulfatov drugikh metallov [Chemical production of hydrogen chloride and chloride-free compound potassium sulfate fertilizers or other metal sulfates]. Patent US, no. 887776, 2011.
- Tomaszewska M. Predvaritelnoe issledovanie konversii khlorida kaliya v sulfat kaliya, ispolzuya membranny reaktor [Preliminary studies on potassium chloride conversion into potassium sulfate using membrane reactor]. *Journal of Membrane Science*, 2008, vol. 317, no. 5, pp. 14–18.
- Timofeev V.I., Buksha Yu.V., Safrigin Yu.A. Sposob polucheniya sulfata kaliya [The method of obtaining potassium sulfate]. Patent RF, no. 2144501, 2000.
- 10. Phinney G., Robin V. Metod polucheniya sulfata kaliya [Method of producing potassium sulfate]. Patent US, no. 6315976, 2001.
- Stefantsova O.G., Akhunova A.B., Rupcheva V.A., Poylov V.Z. Issledovanie stadii polucheniya kislogo sulfata kaliya v tekhnologii proizvodstva sulfatnykh kaliynykh udobreniy [A study of the stage of obtaining acid potassium sulfate in sulfate potassium fertilizers production technology]. Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatelskogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i bio tekhnologiya, 2014, no. 1, pp. 75-83.
- 12. William J., Keith D., Timothy G. *Protsess polucheniya sulfatnogo kaliynogo udobreniya i sulfatov drugikh metallov* [Process for manufacturing potassium sulfate fertilizer and other metal sulfates]. Patent US, no. 6365122, 2002.
- Akhunova A.B., Stefantsova O.G., Rupcheva V.A., Poylov V.Z. Poluchenie gidrosulfata kaliya iz tsiklonnoy pyli khlorida kaliay [A study of the stage of obtaining acid potassium sulfate from cyclone dust of potassium chloride and sulfuric acid]. Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatelskogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i bio tekhnologiya, 2014, no. 3, pp. 79–88.

- Kasikov A.G. Sposob konversii khlorida metalla v ego sulfat [The method of metal chloride conversion with sulfate obtain]. Patent RF, no. 2489502, 2013.
- Lalancette J.-M., Lemieux D., Dubreuil B. Metod polucheniya sulfata kaliya iz khlorida kaliya [Method for producing potassium sulfate from potassium chloride]. Patent US, no. 8409542, 2013.
- Khiguchi. Protsess polucheniya sulfata kaliya i khlorovodorodnoy kisloty [Process for producing potassium sulfate and hydrochloric acid]. Patent Japan, no. 2040109, 1991.
- 17. Shestakov V.V. Tekhnologiya polucheniya beskhloridnykh kaliyno-fosfornykh i kaliyno-magnievykh udobreniy na osnove zhidkofaznoy konversii khlorida kaliya sernoy kislotoy Avtoreferat Dis. Kand. nauk [The production technology of the chlorate-free potassium-phosphorus and potassium-magnesium fertilizers by conversion of potassium chloride by sulfuric acid. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 1990. 15 p
- Bruzd V.G., Rakovskaya V.A., Uskova L.E. Spravochnik pokazateley kachestva khimicheskikh reaktivov [The catalog of chemicals quality indicators]. Moscow, Khimiya Publ., 1968. 992 p.
- Timonin A.S. Osnovy konstruirovaniya i rascheta khimikotekhnologicheskogo i prirodookhrannogo oborudovaniya [The bases of designing and calculating chemical, technological and environmental equipment]. Kaluga, N. Bochkareva Publ., 2002. 852 p.
- Alpert L.Z. Osnovy proektirovaniya khimicheskikh ustanovok [The bases of chemical installations designing]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989. 304 p.
- Stromberg A.G., Semchenko D.P. Fizicheskaya khimiya [The physical chemistry]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 495 p.

Received: 15 September 2015.

## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Принимаются статьи, подготовленные в MS Word-2003 (файл и распечатка). Статья должна быть подписана авторами и иметь сопроводительное письмо на бланке организации.

Объем статьи не менее 8 стр., но не более 20 стр., включая рисунки и таблицы, размещенные в тексте по упоминанию. Размер бумаги А4, поля по 25 мм. Текст в 1 интервал без переносов, лишних пробелов и абзацных интервалов, шрифт Times New Roman, 12 пунктов. Файлы рисунков (в градациях серого) в jpg, tif, cdr или иных форматах редакторов Photoshop, Corel Draw с разрешением 300 dpi прилагаются к статье. Рисунки и таблицы: Рис. 1. Название; Таблица. Название. Кавычки вида «...». Интервалы – 1,2...1,8 мм или 5–7 шт. Формулы – в МаthТуре, настройка по умолчанию. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылка в тексте.

Курсивом – буквы латинского и греческого алфавита, кроме входящих в имена собственные, обозначения стандартных математических функций и химических элементов  $(U_{\rm np}, \Phi_i, \text{ но } A1_2O_3, \cos \alpha_i \text{ max}, \text{ lg, «BASF»})$ . Векторы – полужирным курсивом. Список литературы – по ГОСТ Р 7.0.5–2008 (см. пример). Литература – по упоминанию: [1, 2], [2. С. 245], [3–7]. Список литературы должен включать не менее 20 источников.

УДК 621.37 (Пример оформления статьи)

# АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ (название на английском языке)

**Петров Иван Иванович**, канд. техн. наук, доцент каф. обработки металлов давлением факультета стандартизации, химии и биотехнологии ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38. E-mail: vip111@yandex.ru

**Иванов Андрей Андреевич**, д-р хим. наук, профессор каф. химической технологии топлива и химической кибернетики Института природных ресурсов ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. Е-mail: iip@tpu.ru

Показана возможность расчета ... Установлено, что ... Сделан вывод о том, что ... (Аннотация, 10 кегль, не менее 200 слов).

Ключевые слова: (ниже ключевые слова на английском языке) Усилительный каскад, регулировка тока

В [1, 2] показано, что усилительный каскад с автоматической регулировкой потребляемого тока (АРПТ) позволяет получить ...

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Фамилия И.О. Название книги. М.: Издательство, 2014. 123 с.
- 2. Название книги / под ред. И.О. Фамилия. М.: Издательство, 2014. 123 с.
- 3. Фамилия И.О. Название статьи // Журнал. 2014. Т. 316. № 1. С. 71–77.
- 4. Фамилия И.О. Название диссертации: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2008. 19 с.
- 5. Название изобретения: пат. 2000000 Рос. Федерация. № 2009129009/10; заявл. 27.07.13; опубл. 10.10.14, Бюл. № 4. 3 с.
- 6. Фамилия И.О. Название статьи // Наименование конференции: Труды VII Междунар. научно-практ. конф. молодых ученых. Томск, 2014. Т. 1. С. 226–228.
- 7. Фамилия И.О. Название статьи // Наименование ресурса. 2013. URL: http://www.tpu.ru/htm1/izvestia.htm (дата обращения: 25.09.2014).

### REFERENCES

Поступила 25.01.2013 г.

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Редактирование А.С. Глазырин Компьютерная верстка О.Ю. Аршинова Перевод на англ. язык и корректура С.В. Жаркова Дизайн обложки Т.В. Буланова

Фотографии на обложке взяты из личного архива Валерия Касаткина

Подписано к печати хх.хх.2015. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка». Печать XEROX. Усл. печ. л. 19,31. Уч.-изд. л. 17,46. Заказ ххх-15. Тираж 500 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет Система менеджмента качества Издательства Томского политехнического университета сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001:2008



издательство тпу. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. Тел./факс: 8(3822) 563-291, www.tpu.ru, izv@tpu.ru