

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 327, № 11, 2016

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА.  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

**Редакционная коллегия**

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

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

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2016

**УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!**

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://scholar.google.com)

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

Volume 327, № 11, 2016

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

**Editorial Board**

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

© Tomsk Polytechnic University, 2016

**AIMS AND SCOPES**

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

The journal was founded in 1903.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://scholar.google.com).

## СОДЕРЖАНИЕ

- О возможности использования в сельском хозяйстве глауконита из пород Бакcharского месторождения (Западная Сибирь)**  
Рудмин М.А., Мазуров А.К., Макаров Б.И., Галиханов А.В., Стеблецов М.Д., Чепала К.К.
- Нелинейная динамика сферических гидроакустических приборов, применяемых в нефтегазовой промышленности**  
Мицкевич С.А., Папкина И.В., Захарова А.А., Крысько А.В.
- Основы неразрушающего индукционного контроля изоляции обмоток электрических машин**  
Смирнов Г.В., Смирнов Д.Г.
- Массообменная эффективность ударно-распылительной насадки**  
Андреев М.В., Балчугов А.В., Дубровский Д.А., Коробочкин В.В.
- Седиментационная модель средне-позднеоксфордских отложений Казанской группы месторождений по результатам исследования керна (Западная Сибирь)**  
Кравченко Г.Г., Габова К.В.
- Условия формирования половодья большой водности и прогноз наводнения на реке Абакан**  
Паромов В.В., Шумилова К.А., Гордеев И.Н.
- Особенности микроструктурной неоднородности котельных труб из стали 20 в состоянии заводской поставки**  
Помазова А.В., Артамонцев А.И., Заворин А.С.
- Окислительная плазмохимическая конверсия сероводорода в атмосфере газообразных алканов в присутствии O<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>**  
Кудряшов С.В., Рябов А.Ю., Очередко А.Н.
- Антропогенные почвы на лесных землях санитарно-защитной зоны воздушной линии электропередачи сверхвысокого класса напряжения**  
Захарченко А.В., Пасько О.А., Ипатова Д.В., Раудина Т.В.
- Сравнительные исследования эоценовых и палеоценовых диатомитов Зауралья (на примере Камышловского месторождения и разреза Брусая)**  
Смирнов П.В., Константинов А.О.
- Методика прогноза дождевых паводков в бассейне Верхнего Амура (на примере р. Онон)**  
Лариошкин В.В.

## CONTENTS

- 6 On possibility of using glauconite from rocks of Bakchar deposit (Western Siberia) in agriculture**  
Rudmin M.A., Mazurov A.K., Makarov B.I., Galikhanov A.V., Stebletsov M.D., Chepala K.K.
- 17 Nonlinear dynamics of spherical hydroacoustic devices used in oil and gas industry**  
Mitskevich S.A., Papkova I.V., Zakharova A.A., Krysko A.V.
- 24 Basis for nondestructive induction control of winding insulation of electrical machines**  
Smirnov G.V., Smirnov D.G.
- 37 Mass transfer efficiency of shock-spray packing**  
Andreenko M.V., Balchugov A.V., Dubrovsky D.A., Korobochkin V.V.
- 45 Sedimentological model of mid- and late-Oxfordian deposits in the Kazanskoe group of oilfields on the results of core investigation (West Siberia)**  
Kravchenko G.G., Gabova K.V.
- 57 Conditions of formation of high-water flood and flood forecast on the river Abakan**  
Paromov V.V., Shumilova K.A., Gordeev I.N.
- 68 Features of microstructural inhomogeneity of steel 20 boiler pipes in delivery state**  
Pomazova A.V., Artamontsev A.A., Zavorin A.S.
- 76 Oxidative plasma chemical conversion of H<sub>2</sub>S in gaseous hydrocarbons atmosphere in the presence of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>**  
Kudryashov S.V., Ryabov A.Y., Ocheredko A.N.
- 86 Anthropogenic soils on forest land of sanitary protection zone of extra high voltage overhead lines**  
Zakharchenko A.V., Pasko O.A., Ipatova D.V., Raudina T.V.
- 96 Comparative studies of Eocene and Paleocene diatomite from Trans-Urals region (on the example of Kamyshlov deposit and section Brusyana)**  
Smirnov P.V., Konstantinov A.O.
- 105 Technique of forecasting rain flood in the upper Amur basin (by the example of the Onon river)**  
Larioshkin V.V.

УДК 553.69:552.51:552.56

## О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ ГЛАУКОНИТА ИЗ ПОРОД БАКЧАРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

**Рудмин Максим Андреевич<sup>1</sup>,**  
rudminma@tpu.ru

**Мазуров Алексей Карпович<sup>1</sup>,**  
akm@tpu.ru

**Макаров Борис Игоревич<sup>2</sup>,**  
makar189@mail.ru

**Галиханов Артур Вильшатрович<sup>1</sup>,**  
artur-gal1997@mail.ru

**Стеблецов Максим Дмитриевич<sup>1</sup>,**  
boss.steblecov@mail.ru

**Чепала Константин Константинович<sup>1</sup>,**  
chepala96@gmail.com

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

**Актуальность** исследований связана с возможностью повышения рентабельности разработки Бакчарского месторождения за счет переработки и применения в народном хозяйстве вмещающих пород.

**Цель работы:** создание технологической схемы получения глауконитового концентрата из вмещающих пород и оценка возможности использования этого концентрата в сельском хозяйстве для повышения инвестиционной привлекательности Бакчарского месторождения.

**Методы исследования:** разделение проб на гранулометрические классы размером более 1; 1...0,5; 0,5...0,2; 0,2...0,1; менее 0,1 мм методом «мокрого» просеивания; электромагнитная сепарация при силе тока 3,5...1,8 А; минералогический анализ; силикатный рентгенофлуоресцентный анализ; аграрные опыты.

В пределах Бакчарского месторождения среди глауконитсодержащих пород выделяются глауконитовые руды (глауконитолиты), глауконитовые песчаники, гидрогетит-хлоритовые железные руды с глауконитом. Содержание полезного компонента (глауконита) в глауконитовых рудах составляет 50...70 %, в глауконитовых песчаниках – 20...40 %, в гидрогетит-хлоритовых рудах достигает 10...20 %. В статье приводится описание технологических особенностей этих типов пород. Авторами создана оптимальная технологическая схема получения глауконитового концентрата. Установлено, что наиболее качественный продукт с содержанием полезного компонента 90...100 % извлекается из глауконитовых руд. Для оценки возможности использования глауконита Бакчарского месторождения в качестве минерального удобрения использовался концентрат, полученный при обогащении гидрогетит-хлоритовых руд. Опытным путем доказано стимулирующее воздействие этого концентрата на рост овса (*Avena sativa*), что является прямым признаком его практической пригодности. Полученные результаты показывают возможную эффективность извлечения глауконита Бакчарского месторождения.

### **Ключевые слова:**

Глауконит, глауконитовый концентрат, вмещающие породы, железные руды, технологическая схема, минеральные удобрения, Бакчарское месторождение.

### **Введение**

К группе глауконитов относятся слоистые низкотемпературные магнезиально-железистые гидрослюды с условной формулой  $(K, Na, Ca)(Fe, Al, Mg, Mn)_2(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2$ , обладающие структурой слюды и широкими вариациями химического состава [1, 2]. Минералы данной группы характеризуются неупорядоченной, реже упорядоченной решеткой диоктаэдрического полутипа 1M и 1Md, а также единством формы микронеконкретных агрегатов, которые образуются в морских осадках [3]. Примеры использования

глауконитовых минералов как индикаторов условий древнего осадконакопления освещались во многих публикациях [2–7]. Однако вопросы качественной оценки этого нетрадиционного минерального сырья многоотраслевого использования начали отражаться в литературе со сравнительно недавнего времени.

Благодаря своим специфическим свойствам (наличию красящих окислов, активных катионов калия, слоистой структуре) глаукониты являются ценным сырьем, применяемым в народном хозяйстве. Эти минералы используются в качестве ком-

плексного минерального удобрения, для нужд животноводства и рыбного хозяйства, в производстве эмульсионных и художественных масляных красок, для очистки сточных вод и т. д. [8–15]. В концентратах, предназначенных для использования в народном хозяйстве, доля глауконита должна превышать 40 % (в среднем 60...70 %).

Для использования в качестве калийных удобрений глауконитовые отложения изучаются во многих странах, в том числе и России [11, 12, 15]. Например [9], в штатах Нью-Джерси, Делавэре и Мэриленде (США) добываются глауконитовые зеленые пески, залегающие в средней части Приатлантической низменности в верхнемеловых и палеоценовых отложениях. Эти пески в настоящее время используются для оплодотворения почв. Другим примером являются глауконитовые пески из палеоценовых пластов Саламанка в Патагонии (Аргентина), которые изучались С. Franzosi [8] как минеральные удобрения, альтернативные калийным солям.

Известно, что мировой спрос на калийные удобрения непрерывно возрастает и, как ожидается, достигнет 37,4 млн т в 2017 году [16]. В связи с чем перечень примеров использования глауконитовых концентратов в сельском хозяйстве неуклонно растет.

Все российские предприятия по производству минеральных удобрений находятся в европейской части страны, что делает их продукцию недоступной для сельхозпроизводителей Сибири. В связи с этим в Сибири наблюдается существенное сокращение доли внесения минеральных удобрений в почвы [17], что отрицательно сказывается на их плодородии.

Широко известно, что улучшение плодородия почв и повышение урожайности сельскохозяйственной продукции возможно при использовании минеральных удобрений. Использование отходов местного горного производства в качестве удобрений позволяет сократить расходы сельхозпроизводителей и повысить их прибыльность. К настоящему моменту известно множество практик по использованию горных пород и отходов обогащательного производства в народном хозяйстве [18], к примеру использование мела из вскрышных пород на железорудных карьерах Курской магнитной аномалии для мелиорации почв [19]. Важно понимать, что чем проще технологическая схема получения минерального удобрения, тем выше его экономическая эффективность. При этом использование таких продуктов для повышения плодородия почв не должно иметь никаких отрицательных экологических последствий [20]. Так, например, для производства фосфатного удобрения необходимы большие объемы фосфатного сырья высокого качества и примерно такие же объемы сернокислотного сырья [17]. При этом фосфатные удобрения в России транс-

портируются на большие расстояния, что увеличивает их стоимость для потребителей [20]. Для агропромышленного комплекса Томской области может быть выгодным развитие местной сырьевой базы минеральных удобрений. Этой базой могут служить торфяные залежи, сапропели, бурые угли, а также глауконит.

Исходя из увеличивающегося спроса на калийные удобрения, авторы считают, что не следует оставлять без внимания глауконитовые породы Бакчарского месторождения в Западной Сибири, которые по геологическим условиям схожи со многими породами, используемыми в народном хозяйстве.

### Геологические условия

Изучаемые глауконитовые породы залегают в осадочных толщах Бакчарского месторождения, которое находится в юго-восточной части Западной Сибири (рис. 1), в 200 км на северо-запад от г. Томска. Месторождение относится к Западно-Сибирскому железорудному бассейну [21], который прослеживается широкой полосой от бассейна р. Турухан на севере до верховья р. Тобол на юго-западе. В пределах бассейна известны следующие крупные железорудные районы (рис. 1): Елогуй-Туруханский, Каргасокский, Нарым-Парабельский, Колпашевский, а также наиболее изученное среди всех Бакчарское месторождение.

Железные руды месторождения локализируются среди мел-палеогеновых отложений на глубинах 150...250 метров (рис. 2). Рудовмещающие отложения представлены типичными осадочными породами прибрежно-морского генезиса: песчаниками, песками, алевролитами, алевролитами, глинами с горизонтами оолитовых железных руд [22–24]. В настоящее время месторождение не разрабатывается в силу неблагоприятных горнотехнических условий, а именно высокой обводненности вышележащего рыхлого разреза. В ходе детального изучения разреза месторождения было установлено, что вмещающие породы содержат высокие концентрации глауконита (рис. 2).

Если не брать во внимание промышленную ценность глауконитовых пород Бакчарского месторождения, они, скорей всего, будут складироваться в отвалах (при карьерной разработке) либо уходить в хвосты обогащения. Данный факт существенно занижает истинную ценность месторождения. Потребителями глауконитовых продуктов могут служить организации аграрного и нефтеперерабатывающего секторов, в том числе и химическая промышленность. Авторы считают, что использование глауконита как попутного компонента позволит существенно увеличить окупаемость месторождения. И в настоящее время изучение возможных путей использования глауконитовых пород в различных отраслях человеческой деятельности является весьма важной задачей.

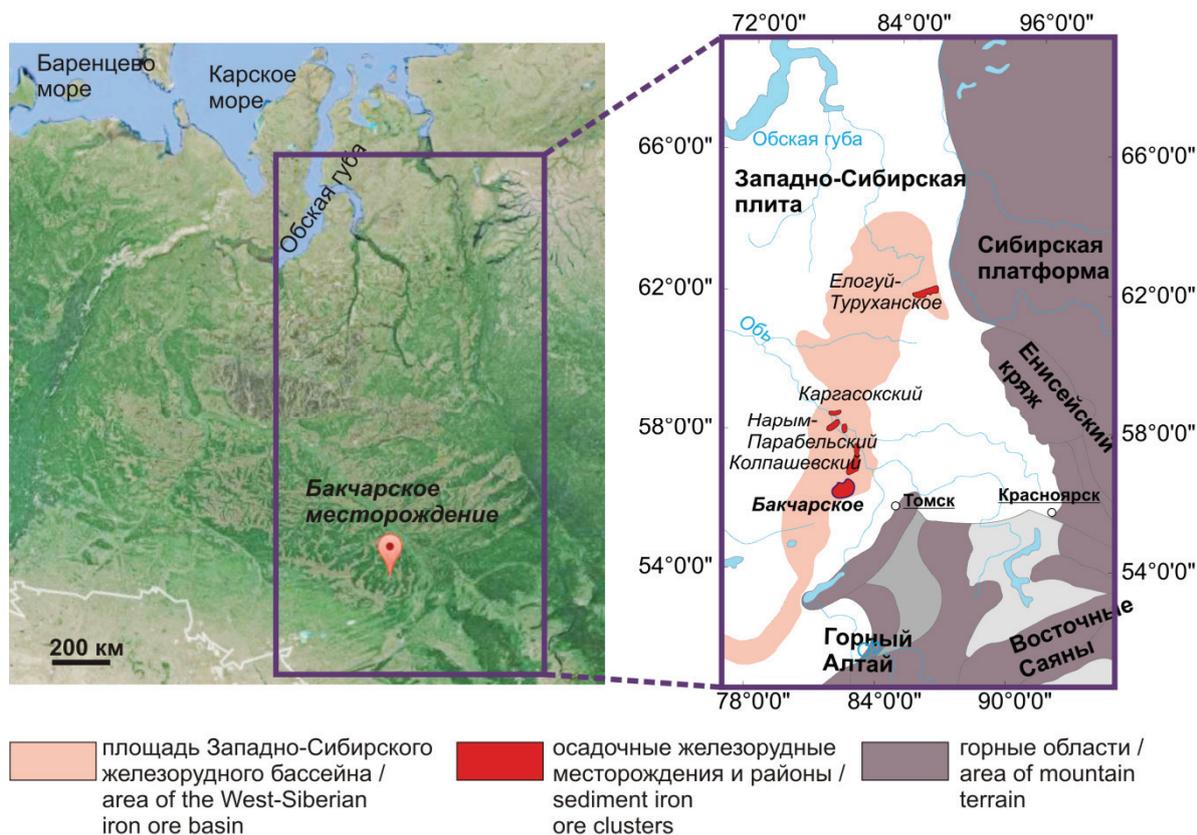


Рис. 1. Обзорная схема расположения Западно-Сибирского железорудного бассейна и Бакcharского месторождения

Fig. 1. Map of location of Western Siberian iron ore basin and Bakchar deposit

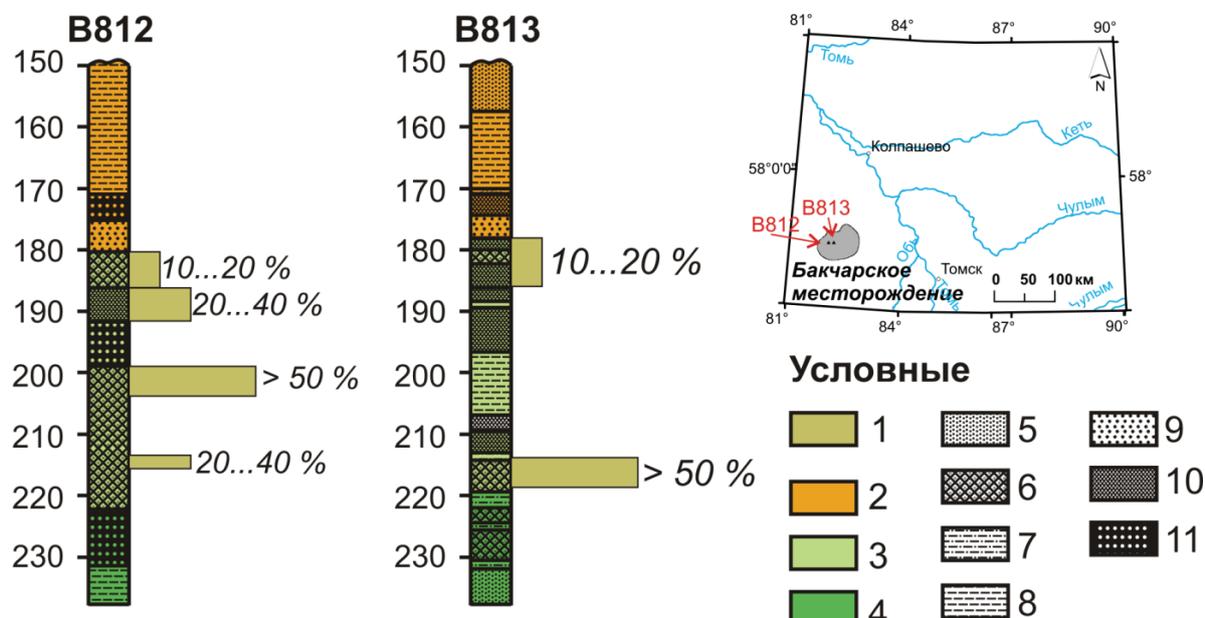


Рис. 2. Схематический разрез рудовмещающей толщи Бакcharского месторождения: 1 – породы с содержанием глауконита более 10 %; 2 – люлинворская свита; 3 – ганькинская свита; 4 – ипатовская свита; 5 – пески; 6 – песчаники; 7 – алевролиты с прослоями глин и песчаников; 8 – глины с прослоями алевролитов; 9 – сыпучие гидрогетитовые руды; 10 – сцементированная гидрогетит-хлоритовые руды; 11 – сцементированные гидрогетит-сидеритовые руды

Fig. 2. Schematic section of the ore-hosting sediments of Bakchar deposit: 1 are the rocks with glauconite content over 10 %; 2 is the lyulinvorskaya formation; 3 is the gankinskaya formation, 4 is the ipatovskaya formation; 5 are the sands; 6 are the sandstones; 7 are the siltstones interbedded with clay and sandstones; 8 are the clays interbedded with siltstones; 9 are the loose hydrogoethite ores; 10 are the cemented hydrogoethite-chlorite ores; 11 are the cemented hydrogoethite-siderite ores

### Фактический материал и методы исследования

Материалом для данных исследований послужили пробы, отобранные из керна скважин. Перед изучением технологических особенностей все пробы глауконитовых пород исследовались на петрографическом микроскопе. Далее для выделения глауконита выполнялось разделение проб методом «мокрого» просеивания на гранулометрические классы: более 1 мм, 1,0...0,5 мм, 0,5...0,2 мм, 0,2...0,1 мм, менее 0,1 мм. Гранулометрические классы 0,5...0,2 мм и 0,2...0,1 мм разделялись на электромагнитном сепараторе (ЭВС 10/5) при силе тока 3,5...1,8 А на немагнитную (более 3,5 А), слабомагнитную (3,5...1,8 А) и магнитную (менее 1,8 А) фракции. В каждой электромагнитной фракции подсчитывалось содержание глауконита весовым методом с отбором монофракции под бинокляром. Силикатный анализ выполнялся методом рентгенофлуоресцентного анализа на микроанализаторе HORIBA XGT-7200. Для проведения количественного анализа пробы истирались до микронных частиц, затем запрессовывались под гидравлическим прессом и спекались при 900 °С в течение 9 часов. Рентгенофлуоресцентный анализ производился при напряжении 50 кВ, силе тока 0,5 мА, диаметре пучка 1,2 мм и продолжительности измерения 100 с. Оптимальная технологическая схема создавалась на основе пробы весом 2 кг.

Глауконитовый концентрат, полученный из подобной пробы, отправлялся на проведение аграрных исследований для оценки возможности его использования в сельском хозяйстве. Внесение глауконитового концентрата в почву выполнялось тремя способами: 1) сухое внесение в почву в концентрации 30, 60, 90 кг/га; 2) предпосевная обработка семян (замачивание семян в водной взвеси глауконитового концентрата с концентрацией 0,0015, 0,005, 0,01, 0,05, 0,1 % в течение 30 мин) перед посевом; 3) полив почвы 20 мл водной взвесью глауконитового концентрата в концентрациях 0,03, 0,06, 0,09 %. Все опыты выполнялись в трех вариантах в чашках Петри. Энергию прорастания овса посевного (*Avena sativa*) определяли на 4-й день опытов, всхожесть – на 7-й день. На 13-й день замерялась высота растений, зеленая масса и сухая масса.

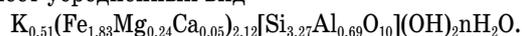
### Обсуждение результатов

Морфология и химический состав глауконита

Подобно глауконитам бассейна Кавери в Индии [5], в отложениях Бакчарского месторождения выделяются глауконитовые пеллеты, формирующиеся в результате изменения фекальных шариков, и глаукониты выполнения, развивающиеся внутри пор, трещин преимущественно отмершей органики. Глауконитовые пеллеты имеют изометричные, округлые (глобулярные, почковидные) морфологические формы [25], глаукониты выполнения – вытянутые глобулярные, гроздевидные, биоморф-

ные, сложные агрегаты. По окраске зёрен были выделены две основные разновидности: фиштакково-зеленые, зеленые и зеленовато-желтые, зеленовато-коричневые. Помимо этого встречаются зёрна синевато-зеленого, почти черного цвета, а также желтые со слабым зеленоватым оттенком. Внутреннее строение глауконитовых глобулей представлено хаотично расположенными пластинками и чешуйками с изрезанными очертаниями. В данной работе термины глауконитовые «глобули», «гранулы», «зёрна», «ооиды» понимаются как синонимы.

Кристаллохимическая формула глауконита имеет усредненный вид



Содержание основных оксидов в глауконите варьирует в следующих пределах:  $K_2O$  – 2,5...7,7 %,  $Fe_2O_{3(total)}$  – 20,2...69,4 %,  $MgO$  – 1,7...2,8 %,  $CaO$  – 0,5...0,9 %,  $Al_2O_3$  – 5,5...11,5 %,  $SiO_2$  – 32,5...52,5 %,  $H_2O$  – 8,3...12,3 % (по разности). В глауконитовых рудах (описанных ниже) глауконит относится к зрелой разновидности по классификации Г. Одина и др. [1, 25, 26]. Его состав имеет следующие средние содержания:  $K_2O$  – 5,59 %,  $Fe_2O_{3(total)}$  – 29,96 %,  $MgO$  – 2,01 %,  $CaO$  – 0,66 %,  $Al_2O_3$  – 7,93 %,  $SiO_2$  – 53,96 %,  $Na_2O$  – 0,34 %,  $P_2O_5$  – 0,09 %,  $TiO_2$  – 0,16 %,  $MnO$  – 0,01 %. При этом содержание  $K_2O$  в минеральном удобрении должно находиться в пределах 2,27...4,05 % [8–10]. Кроме того, данные глаукониты имеют сходство в составе (табл. 1) с разрабатываемыми глауконитами Нью-Джерси (США) и Бондарского месторождения (Россия). Всё это говорит о том, что глаукониты Бакчарского месторождения содержат необходимое количество калия для оплодотворения почв.

**Таблица 1.** Сравнение химического состава глауконита Бакчарского месторождения с разрабатываемыми месторождениями

**Table 1.** Comparison of chemical composition of glauconite of Bakchar deposit with the developed deposits

Оксиды Oxides	Глауконитовые руды Бакчарского месторождения Glauconite ores of the Bakchar deposit	Глаукониты Бондарского месторождения (Россия) [11] Glauconites of Bondarsk deposit (Russia)	Глаукониты Нью-Джерси (США) [9] New Jersey glauconite (USA)
$SiO_2$	53,96	49,79	51,83
$TiO_2$	0,16	0,37	–
$Al_2O_3$	7,93	10,92	6,23
$Fe_2O_3$	29,96	17,18	20,08
$MgO$	2,01	2,17	3,66
$CaO$	0,66	0,64	0,52
$Na_2O$	0,34	0,13	0,76
$K_2O$	5,59	6,79	6,60
$MnO$	0,01	0,02	–
$P_2O_5$	0,09	1,14	0,31

Минералогические, петрографические и технологические характеристики глауконитовых пород

Широко известно, что технологичность глауконитового сырья определяется в первую очередь степенью цементации глауконитсодержащих пород и количеством зернистого глауконита в породе. В разрезе Бакчарского месторождения глауконитовые породы в основном приурочены к ганькинской свите и распространены на глубинах 180...230 м (рис. 2). Отложения с содержанием глауконита более 10 % можно поделить на три типа, отличающиеся по составу, структуре и некоторым технологическим свойствам.

*Глауконитовые руды (или глауконитолиты)* (рис. 3, а) состоят на 50...70 % из гранулированного глауконита с незначительной примесью терригенного материала. Породы имеют ярко-зеленую, реже темно-зеленую и табачно-зеленую окраску, как правило, неслоистые, иногда неяснослоистые за счет субгоризонтальных пелитоморфных сгустков. Структура этих пород алевритово-псаммитовая (реже алевритовая), мелкозернистая, слабосцементированная. Цемент базально-поровый, микрозернистый, гидрослюдистого состава. Иногда в цементе отмечается примесь микрозернистого сидерита, а также стяжения фосфатов или пирита. Процентное содержание фракции 0,2...0,1 мм составляет 37...40 %, 0,5...0,2 мм – 25...34 %, и менее 0,1 мм – 25...31 %. Глауконит преимущественно зеленого, табачного, реже темно-зеленого цвета размером менее 0,3 мм. Глобулы имеют в основном лопастную форму. В породах отмечается растительный детрит, в некоторых участках обвалакивающий компоненты осадка. Глауконитовые руды обладают наиболее благоприятными фазовыми, морфологическими и технологическими критериями (табл. 2) для их многоотраслевого применения. Использование данных пород в качестве минеральных удобрений, компонентов питательных сред (при рекультивации и т. д.) и мощных сорбентов возможно практически без предварительного обогащения. Как показали опыты электромагнитной сепарации, магнитная фракция представляет собой «богатый» глауконитовый концентрат с содержанием полезного компонента 80...100 % (рис. 4, а), что позволяет использовать его даже в качестве красящего пигмента.

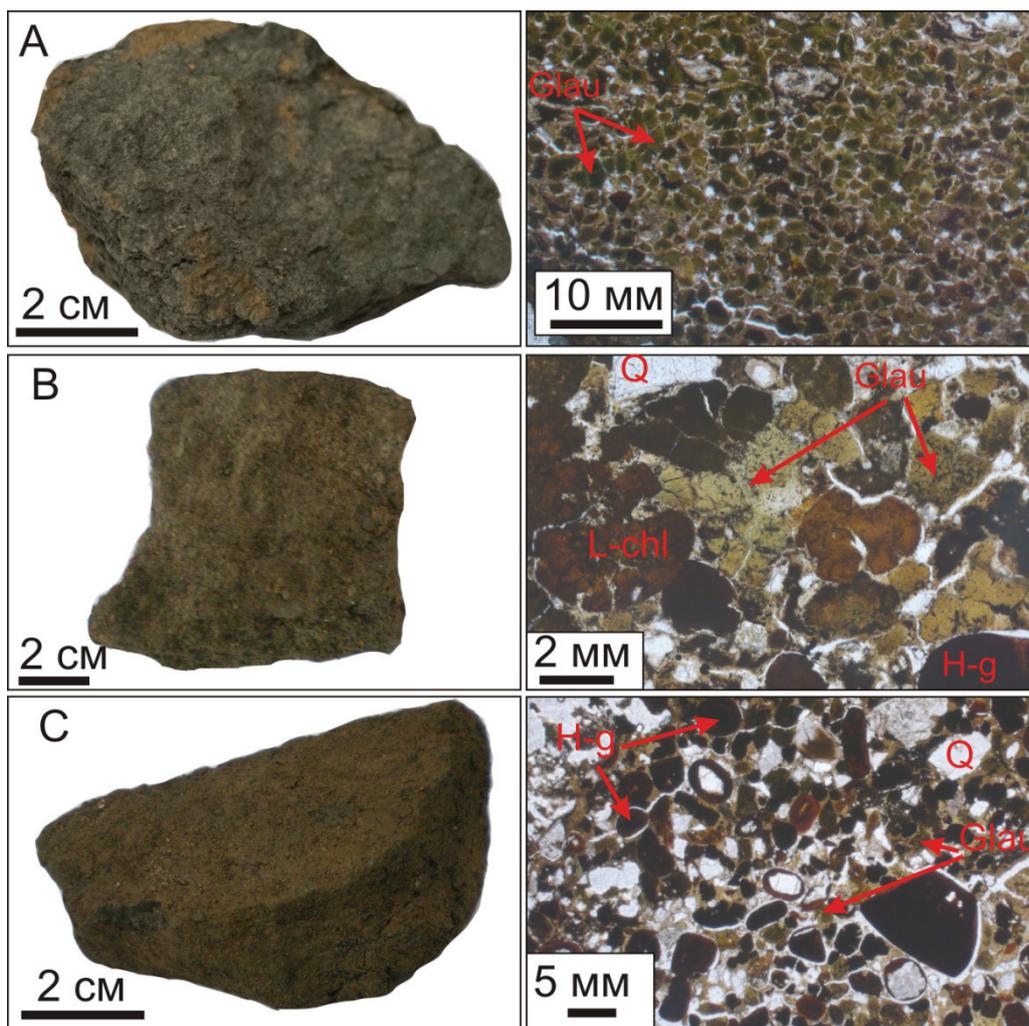
*Глауконитовые песчаники* (рис. 3, б) состоят на 20...40 % и до 50 % из зернистого глауконита, остальное приходится на терригенный материал, лептохлоритовые ооиды и цемент. Породы имеют желтоватую, зеленоватую, тускло-табачную окраску, неслоистые. Структура псаммитовая, среднезернистая, слабосцементированная. Цемент глинистый (гидрослюдистый), поровый, микрозернистый. Наибольший выход имеет гранулометрическая фракция 0,5...0,2 мм – 45...60 %. Глауконит табачного и коричневатого цвета, имеет размеры 0,4...0,1 мм, при этом преобладают зерна менее 0,2 мм. При обогащении данных пород магнитная фракция представляет собой концентрат с содержанием глауконита 60...70 % (рис. 4, б), гидрогетитовых оолитов и лептохлоритовых ооидов – 10...20 %, и глинистых частиц до 30 %. Полученные данные (табл. 2) позволяют считать этот концентрат благоприятным для использования в сельском хозяйстве, в рыбном и животноводческом хозяйстве, а также при рекультивации земель.

*Гидрогетит-хлоритовые руды с глауконитом* (рис. 3, в) состоят из гидрогетитовых оолитов – 20...25 %, лептохлоритовых ооидов – 15...20 %, глауконита – 10...20 %, кварца – 10 %. Состав цемента в этих породах изменяется от глинистого до лептохлоритового и в редких случаях гидрогетитовый. Цемент мелкокристаллический, базальный. Породы характеризуются тускло-табачным цветом, неслоистые. Структура псаммитовая, средне-мелкозернистая, сцементированная, иногда рыхлая. Процентное содержание фракции 0,5...0,2 мм составляет 53...59 %, 0,2...0,1 – 30...38 %, и менее 0,1 – 9...13 %. Содержание общего оксида железа в этих рудах изменяется от 26 до 36 %, что позволяет считать их «бедными» в пределах месторождения. Глауконитовые зерна округлой, лопастной, микрочешуйчатой формы фиштакково-зеленого и табачного цвета с многочисленными трещинками синерезиса. Преобладают окисленные разновидности глобул с коричневой корочкой из гидроокислов железа. Магнитная фракция данных пород на 50...70 % состоит из глауконита (рис. 4, в), остальное приходится на гидрогетитовые оолиты, лептохлоритовые ооиды и алевроглинистые сгустки цементирующего материала. Данный концентрат по технологическим критериям (табл. 2) и составу может быть пригодным для использования в народном хозяйстве.

Следует отметить, что глауконит постоянно присутствует в гидрогетит-хлоритовых рудах с долей менее 10 %. Даже незначительное содержание минерала не позволяет исключать возможность получения глауконитовых концентратов при электромагнитном обогащении данного типа руд.

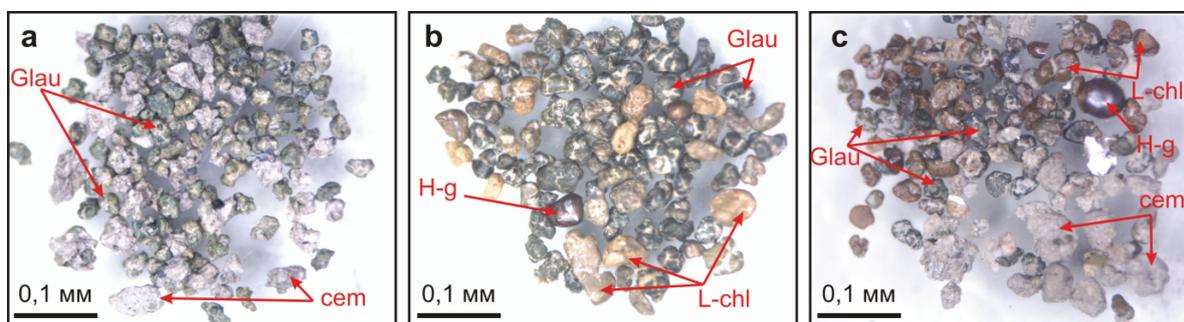
Влияние глауконитового концентрата на рост и развитие растений

Для всех вышеописанных глауконитсодержащих пород была создана единая, оптимальная схема получения глауконитового концентрата (рис. 5). Аграрные исследования выполнялись на основе концентрата, полученного из пробы «бедных» гидрогетит-хлоритовых железных руд, которая была отобрана из трех скважин с глубины 184...186 м. Доля глауконита в этой пробе составила 18 %. Данный тип пород был использован авторами с целью оценки возможности попутного извлечения и использования глауконита в хозяйстве, полученного из наиболее «бедных» глауконитсодержащих отложений. В результате обогащения пробы по созданной схеме (рис. 5) был получен глауконитовый концентрат (рис. 4, в), который на 71 % состоял из гранулированного глауконита и на 29 % из гидрогетитовых оолитов, лептохлоритовых ооидов и алевропелитовых сгустков цемента.



**Рис. 3.** Фотографии образцов (слева) и их изображения в проходящем свете (справа): а – глауконитовая руда (глауконитолит); б – глауконитовый песчаник; с – гидрогетит-хлоритовая руда с глауконитом; Q – кварц; Glau – глауконит; L-chl – лептохлоритовые ооиды; H-g – гидрогетитовые оолиты

**Fig. 3.** Photos of samples (left) and their images in transmission (right): a is the glauconite ore (glauconitolite), b is the glauconite sandstone, c is the hydrogoethite-chlorite ore with glauconite, Q is the quartz, Glau is the glauconite, L-chl are the leptochlorite ooids, H-g are the hydrogoethite oolites



**Рис. 4.** Фотографии глауконитовых концентратов, полученных из глауконитовой руды (а), глауконитового песчаника (б) и гидрогетит-хлоритовой руды (с): Glau – глауконит; L-chl – лептохлоритовые ооиды; H-g – гидрогетитовые оолиты; cem – сгустки цемента

**Fig. 4.** Pictures of glauconite concentrates got from glauconite ore (a), glauconite sandstone (b) and hydrogoethite-chlorite ore (c): Glau is the glauconite, L-chl are the leptochlorite ooids, H-g are the hydrogoethite oolites, cem is the clotty matrix

**Таблица 2.** Технологические показатели различных категорий глауконитовых пород

**Table 2.** Technological parameters of various categories of glauconite rocks

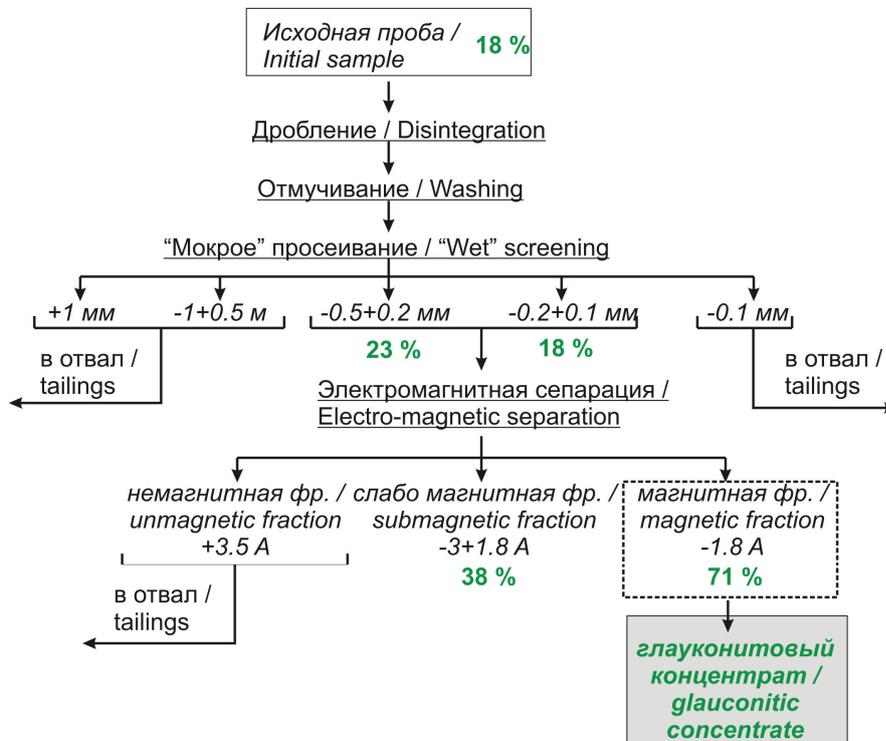
Технологические показатели Technological parameters		Глауконитовая руда Glauconite ore		Глауконитовый песчаник Glauconite sandstone		Гидрогетит-хлоритовая руда с глауконитом Hydrogoethite-chlorite ore with glauconite	
		0.5...0.2	0.2...0.1	0.5...0.2	0.2...0.1	0.5...0.2	0.2...0.1
Фракции, мм Fractions, mm		0.5...0.2	0.2...0.1	0.5...0.2	0.2...0.1	0.5...0.2	0.2...0.1
Содержание Content, %		25,8	42,5	55,4	18,1	58,7	30,7
Содержание Content, %	магнитная magnetic	47,1	92,6	66,6	72,6	25,9	19,0
	слабо магнитная submagnetic	51,6	5,3	6,8	5,5	9,9	9,7
	немагнитная unmagnetic	1,3	2,1	26,6	21,9	64,2	71,4
Содержание глауконита, % Glauconite content, %		98,7	95,8	33,4	50,9	21,3	16,5
Содержание глауконита, % Glauconite content, %	магнитная magnetic	100,0	100,0	50,0	70,0	65,0	70,0
	слабо магнитная submagnetic	100,0	60,0	1	2	45,0	33,0
	немагнитная unmagnetic	0					

Результаты аграрных исследований доказали положительное влияние глауконитового концентрата на рост и развитие овса посевного (*Аvena sativa*). При сухом внесении в почву в концентрациях 3...9 г/м<sup>2</sup> на 2,6...8,6 % увеличивается всхожесть и на 3,4...10 % – энергия прорастания, а при малых и средних концентрациях (3 и 6 г/м<sup>2</sup>) происходит увеличение зеленой массы растений относительно контрольного варианта на 8,2 и 11,7 % соответственно. При замачивании семян в растворе глауконита с концентрациями 0,001...0,1 % на 1,4...7,4 % увеличивается всхожесть, на 2...4 % – энергия прорастания посевного овса. При поливе почвы глауконитовым раствором с концентрациями 0,03...0,09 % рост и развитие растения проходили на уровне контрольного варианта.

Для оценки воздействия на почвы микропримесей, содержащихся в глауконитовом концентрате, были проведены соответствующие анализы. Установлено, что количество вредных веществ (As, Pb, V, Mn, Sb) в почвах после внесения в них глауконита не превышает их количество в исходных почвах, при этом также неизменным, в сравнении с фоновым значением, остается и общая радиоактивность.

#### Заключение

Во вмещающих осадочных толщах Бакчарского месторождения выделяется несколько типов глауконитсодержащих пород: глауконитовые руды (или глауконитолиты), глауконитовые песча-



**Рис. 5.** Схема получения глауконитового концентрата из пород Бакчарского месторождения. Зелеными цифрами обозначается содержание глауконита в соответствующем продукте (фракции) для пробы гидрогетит-хлоритовых железных руд с глауконитом

**Fig. 5.** Flow sheet of obtaining glauconite concentrate from rocks of the Bakchar deposit. Green numbers indicate glauconite content in the appropriate product (fraction) for a sample of hydrogoethite-chlorite iron ore with glauconite

ники, гидрогетит-хлоритовые железные руды с глауконитом.

В результате исследований была создана оптимальная технологическая схема получения глауконитовых концентратов из выделенных типов пород. В зависимости от содержания глауконита в исходных пробах (типах пород) возможно обогащение концентратов разнопланового использования. Из глауконитовых руд получается продукт с содержанием полезного компонента 90...100 %. Этот продукт по технологическим критериям пригоден для использования практически во всех областях, в которых в настоящее время востребовано глауконитовое сырье. Глауконитовые песчаники и железные руды с содержанием глауконита более 10 % при обогащении дают концентраты, пригодные к использованию в сельском хозяйстве.

Результаты аграрных опытов показали, что добавление глауконитового концентрата, полученно-

го при обогащении «бедных» железных руд, способствует повышению урожайности овса. Максимальные биометрические показатели, а также улучшение всхожести, энергии прорастания наблюдались при внесении глауконитового продукта в почву при концентрациях 6 г/м<sup>2</sup>. Полученные данные доказывают целесообразность извлечения и применения в сельском хозяйстве глауконита Бакcharского месторождения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и администрации Томской области в рамках научного проекта 16-45-700090.*

*Авторы выражают благодарность и признательность сотрудникам Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа О.Н. Змеевой, Л.Д. Проскуриной и Л.В. Петровой за выполнение аграрных исследований, а также сотруднику Института физики прочности и материаловедения А.С. Буякову за оказанную помощь в подготовке проб.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Odin G.S., Matter A. De glauconiarium origine // *Sedimentology*. – 1981. – V. 28. – P. 611–641.
2. Николаева И.В. Минералы группы глауконита в осадочных формациях. – Новосибирск: Наука, 1977. – 321 с.
3. Drits V.A., Kossovskaya A.G. Genetic types of dioctahedral mica. Iss. 1: The family iron-magnesia mica (glauconite seladonite) // *Lithology and mineral resources*. – 1986. – V. 5. – P. 563–580.
4. Substrate control on formation and maturation of glauconites in the Middle Eocene Harudi Formation, western Kutch / S. Banerjee, S.L. Chatteraj, P.K. Saraswati, S. Dasgupta, U. Sarkar // *Marine and Petroleum Geology*. – 2012. – V. 30(1). – P. 144–160.
5. Compositional variability of glauconites within the Upper Cretaceous Karai Shale Formation, Cauvery Basin, India: implications for evaluation of stratigraphic condensation / S. Banerjee, U. Bansal, K. Pande, S.S. Meena // *Sedimentary Geology*. – 2016. – V. 331. – P. 12–29.
6. Banerjee S., Bansal U., Thorat A.V. A review on palaeogeographic implications and temporal variation in glaucony composition // *Journal of Palaeogeography*. – 2016. – V. 5(1). – P. 43–71.
7. Meunier A., El Albani A. The glauconite-Fe-illite-Fe-smectite problem: a critical review // *Terra Nova*. – 2007. – V. 19(2). – P. 95–104.
8. Franzosi C., Castro L.N., Celeda A.M. Technical Evaluation of Glauconies as Alternative Potassium Fertilizer from the Salamanca Formation, Patagonia, Southwest Argentina // *Nat. Resour. Res.* – 2014. – V. 23(3). – P. 311–320.
9. Heckman J.R., Tedrow J.C.F. Green sand as a soil Amendment // *Better Crops*. – 2004. – V. 88. – P. 1–17.
10. The potential of glauconitic sandstone as a potassium fertilizer for olive plants / E. Karimi, A. Abdolzadeh, H.R. Sadeghipour, A. Amine // *Archives Agron. Soil Sci.* – 2011. – V. 58(9). – P. 983–993.
11. Левченко Е.Н., Тигунов Л.П. Глауконит России: состояние, перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы. – М.: ВИМС, 2011. – 65 с.
12. Ляшко В.Ф., Забылов В.С., Добровольский И.П. Повышение плодородия почв южной лесостепной зоны Челябинской области // *АПК России*. – 2015. – № 72(2). – P. 141–148.
13. The group composition of metal compounds in soil as an index of soil ecological state / S.S. Mandzhieva, T.M. Minkina, S.N. Sushkova, G.V. Motuzova, T.V. Bauer, V.A. Chaplgin // *American Journal of Agricultural and Biological Science*. – 2013. – V. 9(1). – P. 19–24.
14. Effect of canola rhizosphere and silicate dissolving bacteria on the weathering and K release from indigenous glauconite shale / N. Rahimzadeh, F. Khormali, M. Olamaee, A. Amini, E. Dordipour // *Biology and Fertility of Soils*. – 2015 – V. 51(8). – P. 973–981.
15. Changes in the properties and productivity of leached chernozem and gray forest soil under the impact of ameliorants / A.K. Yapparov, L.M. Bikkinina, I.A. Yapparov, S.A. Aliev, A.M. Ezhkova, V.O. Ezhkov, R.R. Gazizov // *Eurasian Soil Science*. – 2015. – V. 48(10). – P. 1149–1158.
16. Heffer P., Prudhomme M. Fertilizer outlook 2013–2017 // 81<sup>st</sup> IFA Annual Conference. – Chicago, U.S.A., 2013. – P. 1–6.
17. Лбов В.А., Лбов А.В. Агротехническое сырье // *Разведка и охрана недр*. – 2007. – № 12. – С. 58–54.
18. Бгатов В.И., Мотовилов К.Я., Спешилова М.Т. Функции природных минералов в обменных процессах сельскохозяйственной птицы // *Сельскохозяйственная биология*. – 1989. – № 7. – С. 98–103.
19. Шок И.А., Ермолович Е.А., Владыка М.В. К вопросу эффективности использования вскрышных меловых пород КМА для повышения плодородия почв // *Горный журнал*. – 2014. – № 8. – С. 59–62.
20. Проблемы и перспективы развития минерально-сырьевой базы агрохимического сырья Российской Федерации / Ю.В. Баталин, Р.З. Фахрутдинов, М.И. Карпова, И.С. Садыков // *Разведка и охрана недр*. – 2005. – № 9. – С. 7–10.
21. Западно-Сибирский железорудный бассейн / под ред. Ф.Н. Шахова. – Новосибирск: СО РАН СССР, 1964. – 448 с.
22. Rudmin M., Mazurov A., Bolsunovskaya L. Mineral and elemental composition features of «Loose» oolitic ores in Bakchar iron ore cluster (Tomsk Oblast) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2014. – V. 21(1). – art. numb. 012003.
23. Rudmin M., Mazurov A., Ruban A. Facies and Sedimentation Model of Iron-ore Sequence in Bakchar Deposit // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.: Scientific and Technical Challenges in the Well Drilling Progress*. – 2015. – V. 24. – art. numb. 012028.
24. Structural-chemical features and morphology of glauconites in sedimentary iron ore of Bakchar prospect (Western Siberia) / M. Rudmin, I. Reva, A. Gunko, A. Mazurov, R. Abramova // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* – 2015. – V. 27. – art. numb. 012026.
25. Amorosi A., Centineo M.C., D'Atri A. Lower miocene glaucony-bearing deposits in the SE tertiary piedmont basin (Northern Italy) // *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*. – 1997. – V. 103(1). – P. 101–110.
26. Amorosi A. The occurrence of glaucony in the stratigraphic record: distribution patterns and sequence-stratigraphic significance // *Rendiconti Online Societa Geologica Italiana*. – 2012. – V. 20. – P. 6.

Поступила 06.09.2016 г.

#### **Информация об авторах**

**Рудмин М.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, ассистент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Мазуров А.К.**, доктор геолого-минералогических наук, первый проректор, профессор кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Макаров Б.И.**, аспирант кафедры экологической и сельскохозяйственной биотехнологии Института биологии, экологии, почвоведения, сельского и лесного хозяйства Национального исследовательского Томского государственного университета.

**Галиханов А.В.**, студент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Стеблецов М.Д.**, студент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Чепала К.К.**, студент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 553.69:552.51:552.56

## ON POSSIBILITY OF USING GLAUCONITE FROM ROCKS OF BAKCHAR DEPOSIT (WESTERN SIBERIA) IN AGRICULTURE

**Maxim A. Rudmin<sup>1</sup>,**  
rudminma@tpu.ru

**Aleksey K. Mazurov<sup>1</sup>,**  
akm@tpu.ru

**Boris I. Makarov<sup>2</sup>,**  
makar189@mail.ru

**Artur V. Galikhanov<sup>1</sup>,**  
artur-gal1997@mail.ru

**Maxim D. Stebletsov<sup>1</sup>,**  
boss.steblecov@mail.ru

**Konstantin K. Chepala<sup>1</sup>,**  
chepala96@gmail.com

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>2</sup> National Research Tomsk State University,  
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the research is associated to the possibility of increasing the profitability of the development of the Bakchar deposit through the processing and application of wall rocks in national economy.

**The aim** of the work is to develop the technological schemes of glauconite concentrate from wall rocks, as well as to assess the possibility of using the concentrate in agriculture to increase the investment attractiveness of the Bakchar deposit.

**The methods used in the work:** separation of samples for particle-size classes more than 1; 1...0,5; 0,5...0,2; 0,2...0,1; less than 0,1 mm by the «wet» screening; electromagnetic separation at of 3,5...1,8 A current; mineralogical analysis; Silicate X-ray fluorescence analysis; agricultural experiments.

Glauconite ores (glaukonitolite), glauconite sandstones, hydrogoethite-chlorite iron ore with glauconite are allocated among glauconite rocks within the Bakchar deposit. Content of valuable component (glauconite) in the ore glauconite is 50...70 %, in glauconite sandstones – 20...40 %, in hydrogoethite-chlorite ores – 10...20 %. The paper describes the technological features of these types of rocks. The authors have developed the optimal flow sheet of glauconite concentrates. It was found that the most qualitative product is extracted from glauconite ores (glaukonitolite). This product contains 90...100 % of valuable component. To assess the possibility of using glauconite of the Bakchar deposit as a mineral fertilizer the authors used the concentrate obtained at enrichment of hydrogoethite-chlorite iron ore. It was proved experimentally that the concentrate has a positive effect on oat (*Avena sativa*) growth. That is the direct evidence of practical usefulness of the concentrate. The results obtained prove the possible efficiency of glauconite extraction in the Bakchar deposit.

### Key words:

Glauconite, glauconite concentrate, wall rocks, iron ore, flow sheet, mineral fertilizer, Bakchar deposit.

The research was financially supported by the RFBR and Tomsk Region Administration within the scientific project 16–45–700090. The authors express gratitude to O.N. Zmeeva, L.D. Proskurina, L.V. Petrova, the members of Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, for agricultural investigations, as well as to A.S. Byakov, the member of the Institute of Strength Physics and Material Science (Tomsk), for his aid in sample preparation.

### REFERENCES

1. Odin G.S., Matter A. De glauconiarium origine. *Sedimentology*, 1981, vol. 28, pp. 611–641.
2. Nikolaeva I. *Mineraly gruppy glaukonita v osadochnykh formatsiyakh* [Minerals of Glauconite Group in Sedimentary Formations]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 319 p.
3. Drits V.A., Kossovskaya A.G. Genetic types of dioctahedral mica. Iss. 1: the family iron-magnesia mica (glauconite seladonite). *Lithology and mineral resources*, 1986, vol. 5, pp. 563–580.
4. Banerjee S., Chattoraj S.L., Saraswati P.K., Dasgupta S., Sarkar U. Substrate control on formation and maturation of glauconites in the Middle Eocene Harudi Formation, western Kutch. *India Marine and Petroleum Geology*, 2012, vol. 30 (1), pp. 144–160.
5. Banerjee S., Bansal U., Pande K., Meena S.S. Compositional variability of glauconites within the Upper Cretaceous Karai Shale Formation, Cauvery Basin, India: implications for evaluation of stratigraphic condensation. *Sedimentary Geology*, 2016, vol. 331, pp. 12–29.
6. Banerjee S., Bansal U., Thorat A.V. A review on palaeogeographic implications and temporal variation in glaucony composition. *Journal of Palaeogeography*, 2016, vol. 5 (1), pp. 43–71.
7. Meunier A., El Albani A. The glauconite-Fe-illite-Fe-smectite problem: a critical review. *Terra Nova*, 2007, vol. 19, pp. 95–104.

8. Franzosi C., Castro L.N., Celeda A.M. Technical Evaluation of Glauconies as Alternative Potassium Fertilizer from the Salamanca Formation, Patagonia, Southwest Argentina. *Nat. Resour. Res.*, 2014, vol. 23 (3), pp. 311–320.
9. Heckman J.R., Tedrow J.C.F. Green sand as a soil Amendment. *Better Crops*, 2004, vol. 88, pp. 1–17.
10. Karimi E., Abdolzadeh A., Sadeghipour H.R., Aminey A. The potential of glauconitic sandstone as a potassium fertilizer for olive plants. *Archives Agron. Soil Sci.*, 2011, vol. 58 (9), pp. 983–993.
11. Levchenko E., Tigonov L. *Glaukonit Rossii: sostoyanie, perspektivy osvoeniya i razvitiya mineralno-syrevoy bazy* [Glauconite of Russia: state, perspectives of exploitation and development of mineral resources]. Moscow, VIMS Press, 2011. 65 p.
12. Lyashko V.F., Zabylov V.S., Dobrovolsky I.P. Povyshenie plodorodiya pochv yuzhnoy lesostepnoy zony Chelyabinskoy oblasti [Improving soil fertility in the southern forest-steppe zone of Chelyabinsk region]. *Agro-industrial complex of Russia*, 2015, vol. 72 (2), pp. 141–148.
13. Mandzhieva S.S., Minkina T.M., Sushkova S.N., Motuzova G.V., Bauer T.V., Chaplgin V.A. The group composition of metal compounds in soil as an index of soil ecological state. *American Journal of Agricultural and Biological Science*, 2013, vol. 9 (1), pp. 19–24.
14. Rahimzadeh N., Khormali F., Olamaee M., Amini A., Dordipour E. Effect of canola rhizosphere and silicate dissolving bacteria on the weathering and K release from indigenous glauconite shale. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, vol. 51 (8), pp. 973–981.
15. Yapparov A.K., Bikkinina L.M., Yapparov I.A., Aliev S.A., Ezhkova A.M., Ezhkov V.O., Gazizov R.R. Changes in the properties and productivity of leached chernozem and gray forest soil under the impact of ameliorants. *Eurasian Soil Science*, 2015, vol. 48 (10), pp. 1149–1158.
16. Heffer P., Prudhomme M. Fertilizer outlook 2013–2017. *81<sup>st</sup> IFA Annual Conference*. Chicago, U.S.A, 2013. pp. 1–6.
17. Lbov V.A., Lbov A.V. *Agrokhimicheskoe syre* [Agrochemical raw materials]. *Prospect and protection of mineral resources*, 2007, no. 12, pp. 58–54.
18. Bgatov V.I., Motovilov K.Ya., Speshilova M.T. Funktsii prirodnikh mineralov v obmennykh protsessakh selskokhozyaystvennoy ptitsy [Features of natural minerals in metabolic processes of poultry]. *Agricultural Biology*, 1989, no. 7, pp. 98–103.
19. Shok I.A., Ermolovich E.A., Vladyka M.V. K voprosu effektivnosti ispolzovaniya vskryshnykh melovykh porod KMA dlya povysheniya plodorodiya pochv [On the issue of the effectiveness of using overburden rocks of Cretaceous KMA to increase soil fertility]. *Mining journal*, 2014, no. 8, pp. 59–62.
20. Batalin Yu.V., Fakhruddinov R.Z., Karpova M.I., Sadykov I.S. Problemy i perspektivy razvitiya mineralno-syrevoy bazy agrokhimicheskogo syrya Rossiyskoy Federatsii [Problems and prospects of development of mineral resource base of agrochemical raw materials of the Russian Federation]. *Prospect and protection of mineral resources*, 2005, no. 9, pp. 7–10.
21. *Zapadno-Sibirsky zhelezorudny basseyn* [West Siberian iron ore basin]. Ed. by F.N. Shakhov. Novosibirsk, SO RAN SSSR Press, 1964. 448 p.
22. Rudmin M., Mazurov A., Bolsunovskaya L. Mineral and elemental composition features of «Loose» oolitic ores in Bakchar iron ore cluster (Tomsk Oblast). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, vol. 21 (1), art. numb. 012003.
23. Rudmin M., Mazurov A., Ruban A. Facies and Sedimentation Model of Iron-ore Sequence in Bakchar Deposit. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 24, art. numb. 012028.
24. Rudmin M., Reva I., Gunko A., Mazurov A., Abramova R. Structural-chemical features and morphology of glauconites in sedimentary iron ore of Bakchar prospect (Western Siberia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27, art. numb. 012026.
25. Amorosi A., Centineo M.C., D'Atri A. Lower miocene glaucony-bearing deposits in the SE tertiary piedmont basin (Northern Italy). *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 1997, vol. 103 (1), pp. 101–110.
26. Amorosi A. The occurrence of glaucony in the stratigraphic record: distribution patterns and sequence-stratigraphic significance. *Rendiconti Online Societa Geologica Italiana*, 2012, vol. 20, pp. 6.

Received: 6 September 2016.

#### Information about the authors

**Maxim A. Rudmin**, Cand. Sc., assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Aleksey K. Mazurov**, Dr. Sc., first vice-rector, professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Boris I. Makarov**, postgraduate, National Research Tomsk State University.

**Artur V. Galikhanov**, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Maxim D. Stebletsov**, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Konstantin K. Chepala**, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 539.3:534.1

## НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА СФЕРИЧЕСКИХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Мицкевич Светлана Александровна<sup>1</sup>,  
svetlana.mitskevich@gmail.com

Папкина Ирина Владиславовна<sup>1</sup>,  
ikravzova@mail.ru

Захарова Алена Александровна<sup>2</sup>,  
zaa@tpu.ru

Крысько Антон Вадимович<sup>1,2</sup>,  
anton.krysko@gmail.com

<sup>1</sup> Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина,  
Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность исследования.** Добыча нефти в настоящее время является одной из важнейших отраслей в экономике России. Ее работа во многом зависит от уровня развития применяемых геофизических информационно-измерительных систем и лежащих в их основе физических методов получения информации. Одним из ведущих методов скважинной геофизики является акустический метод, объемы применения которого составляют около 10 % от общего объема геофизических исследований скважин. Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью повышения точности получаемых данных с помощью акустического каротажа. Эффективность действия акустического каротажа во многом зависит от качественного пакета упругих колебаний, регистрируемого приборами акустического каротажа. Создание математической модели движения элемента гибкого сферического преобразователя и дальнейшее исследование частотных характеристик упругих колебаний представляется весьма актуальной научно-практической задачей.

**Цель работы** заключается в исследовании вынужденных колебаний сферического преобразователя, который является составной частью акустического каротажа.

**Результаты.** Из вариационных принципов построены исходные дифференциальные уравнения движения элемента осесимметричной сферической оболочки с учетом геометрической нелинейности в виде Кирхгофа–Лява. Разработан алгоритм решения системы нелинейных дифференциальных уравнений при помощи метода конечных разностей, матричного метода и метода Рунге–Кутты. Анализ нелинейных колебаний сферической оболочки проводился с позиции нелинейной динамики и качественной теории дифференциальных уравнений. Показано, что в задачах нелинейной динамики сферических осесимметричных оболочек возможно в окрестностях определенных линий поверхности появление вмятин. Установлено, что переход от гармонических колебаний к хаотическим для жестко защемленной сферической оболочки происходит по сценарию Рюэля–Такенса–Ньюхауза (частота возбуждения близка к собственной).

### Ключевые слова:

Вмятины, сценарии появления хаоса, осесимметричные сферические оболочки, переход от гармонических к хаотическим колебаниям, вейвлет-анализ, сценарий Рюэля–Такенса–Ньюхауза.

### Введение

В современных приборах акустического каротажа [1, 2] применяют монополюсные сферические преобразователи. Их используют для возбуждения продольных и поперечных волн, которые распространяются одинаково во всех направлениях. Для возбуждения упругих возмущений в скважинных приборах для получения физических характеристик пород применяют электроакустические преобразователи, в которых электрическая энергия преобразуется в энергию колебаний излучателя. Такой же преобразователь (приемник), находящийся в упругом поле, преобразует энергию упругих колебаний в электрическую. Амплитуда колебаний излучателя должна быть максимальной, поскольку амплитуда волны с удалением от источника быстро убывает, поэтому необходимо знать соб-

ственную частоту сферического излучателя, так как максимальная амплитуда достигается при действии на излучатель нагрузкой с частотой, близкой к собственной частоте. При увеличении нагрузки в нелинейных системах могут возникать кратные, независимые частоты, а также хаотические колебания, тогда пакет упругих колебаний, регистрируемый приборами акустического каротажа, будет содержать колебания значительного количества волн и этим затруднять чтение пакета. В настоящее время описана математическая модель сферического преобразователя в линейной постановке [3].

Следует отметить, что впервые в данной работе для задач нелинейной динамики выявлено, что для сферической оболочки возможно появление локализованных вмятин. При решении методом

Бубнова–Галеркина статических задач А.С. Вольмир обнаружил возникновение выпучиваний в круглой оболочке [4], в работе А.В. Погорелова [5, 6] определение состояний сводится к решению задачи на экстремуму для функционала на изометрических преобразованиях исходной формы оболочки, в монографии Э.И. Григолюка и В.В. Кабанова [7] для определения критической нагрузки и формы потери устойчивости используются собственные значения и собственный вектор, а с помощью асимптотических методов такая локализация была описана в работах Г.И. Михасева и П.Е. Товстика [8]. В монографии В.М. Бабича и В.С. Булдырева [9] построены локализованные собственные функции типа «шепчущей галереи» и «прыгающего мячика» для уравнения Гельмгольца. В монографии В.П. Маслова [10] асимптотическим методом для получения квазиклассических решений построены локализованные решения для уравнений в частных производных с малым параметром. Изменение формы колебаний также происходит при потере устойчивости системы [11–13]. Моделированию колебаний сферической оболочки посвящены работы [14, 15]. Однако в известных нам работах нет анализа форм колебаний гибких круглых в плане осесимметричных сферических оболочек, находящихся под действием поперечной равномерно распределенной знакопеременной нагрузки.

Целью данной работы было показать характер колебаний оболочки, находящейся под действием знакопеременной нагрузки, а также зависимость появления количества ребер в сферической оболочке при действии знакопеременной нагрузки от амплитуды нагрузки.

#### Постановка задачи и метод решения

Рассмотрим сферическую пологую оболочку в полярной системе координат, введенной следующим образом:  $\Omega = \{(r, z) \mid r \in [0, b], -h/2 \leq z \leq h/2\}$  (рисунок).

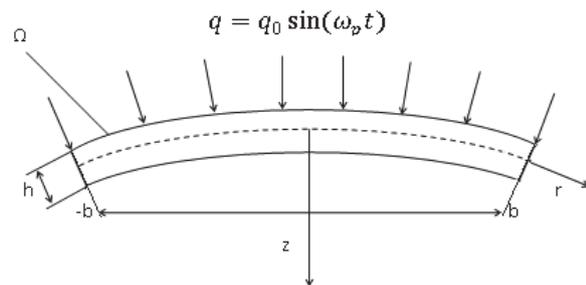


Рисунок. Расчетная схема

Figure. Design scheme

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \varepsilon \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial^4 w}{\partial r^4} - \frac{2}{r} \frac{\partial^3 w}{\partial r^3} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} - \frac{1}{r^3} \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{\Phi}{r} \left(1 - \frac{\partial^2 w}{\partial r^2}\right) - \frac{\partial \Phi}{\partial r} \left(1 - \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r}\right) + 4q,$$

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial \Phi}{\partial r} = \frac{\partial w}{\partial r} \left(1 - \frac{1}{2r} \frac{\partial w}{\partial r}\right), \quad \Phi = \frac{\partial F}{\partial r}. \quad (1)$$

Здесь введены безразмерные величины:

$$\bar{t} = \omega_0 t; \quad \omega_0 = \sqrt{Eg / \gamma R^2}; \quad b = (c / \sqrt{Rh});$$

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon R / h \sqrt{g / (\gamma E)}; \quad \bar{F} = \eta F / Eh^3; \quad \bar{w} = w \sqrt{\eta} / h;$$

$$\bar{r} = br / c; \quad \eta = 12(1 - \nu^2);$$

$$\bar{q} = \bar{q}_3 = (R / h)^2 q_3 \sqrt{\eta} / (4E),$$

где  $t$  – время;  $\varepsilon$  – коэффициент вязкого сопротивления среды, в которой происходит движение оболочки;  $F$  – функция усилий;  $w$  – функция прогиба;  $R, c$  – главный радиус кривизны оболочки и радиус опорного контура соответственно;  $h$  – толщина оболочки;  $b$  – параметр пологости;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $r$  – расстояние от оси вращения до точки на срединной поверхности;  $q$  – параметр внешней нагрузки;  $\omega_0$  – частота собственных малых колебаний;  $E$  – модуль упругости;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\gamma$  – удельный вес. Для краткости черта над безразмерными величинами в (1) опущена. Производные по  $t$  и далее будем обозначать штрихом. К системе (1) следует присоединить граничные и начальные условия. Граничные условия для оболочки с жестко защемленным опорным контуром запишутся в виде

$$\frac{\partial \Phi}{\partial r} - \nu \frac{\Phi}{b} = 0, \quad w = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial r} = 0, \quad \text{при } r = b; \quad (2)$$

начальные условия:

$$w = f_1(r, 0), \quad w' = f_2(r, 0); \quad (3)$$

условия в вершине, выполняющиеся в малой окрестности вершины оболочки:

$$\Phi \approx Ar, \quad \Phi' \approx A, \quad w \approx B + Cr^2,$$

$$w'' \approx 2Cr, \quad w''' \approx 2C, \quad w'''' \approx 0. \quad (4)$$

Для сведения распределенной системы (1)–(4) к системе с сосредоточенными параметрами воспользуемся методом конечных разностей с аппроксимацией  $O(\Delta^2)$ . Запишем систему (1)–(4) в конечно-разностных соотношениях по пространственной переменной  $r$ :

$$\ddot{w} + \varepsilon \dot{w} = -\frac{w_{i+1} - w_{i-1}}{2\Delta} \left( \frac{1}{r_i^3} - \frac{\Phi_{i+1} - \Phi_{i-1}}{2r_i \Delta} \right) +$$

$$+ \frac{w_{i+1} - 2w_i + w_{i-1}}{r_i \Delta^2} \left( \Phi_i + \frac{1}{r_i} \right) - \frac{\Phi_{i+1} - \Phi_{i-1}}{2\Delta} - \frac{\Phi_i}{r_i} -$$

$$- \frac{w_{i+2} - 4w_{i+1} + 6w_i - 4w_{i-1} + w_{i-2}}{\Delta^4} -$$

$$- \frac{w_{i+2} - 2w_{i+1} + 2w_{i-1} - w_{i-2}}{2r_i \Delta^3} + 4q_i,$$

$$\Phi_{i+1} \left[ \left( -\frac{1}{\Delta^2} - \frac{1}{2r_i \Delta} \right) + \Phi_i \left( \frac{2}{\Delta^2} + \frac{1}{r_i^2} \right) + \right. \\ \left. + \Phi_{i-1} \left( -\frac{1}{\Delta^2} + \frac{1}{2r_i \Delta} \right) \right] =$$

$$= -\frac{w_{i+1} - w_{i-1}}{2\Delta} \left( 1 - \frac{w_{i+1} - w_{i-1}}{4r_i \Delta} \right), \quad (5)$$

где  $\Delta=b/n$ ;  $n$  – число участков деления радиуса оболочки.

Граничные условия для оболочки с жестко заземленным опорным контуром:

$$\Phi_{i+1} = \Phi_{i-1} + \frac{2\Delta v}{b} \Phi_i; \quad (6)$$

$$w_{n+1} = w_{n-1}; \quad w_n = 0 \quad \text{при} \quad r_n = b;$$

начальные условия:

$$w_n = 0, \quad w'_n = 0, \quad (0 \leq k \leq m), \quad 0 \leq t < \infty. \quad (7)$$

Если пренебречь малыми слагаемыми и заметить дифференциальные операторы центральными конечно-разностными при  $r=\Delta$ , получим условия в вершине:

$$\Phi_0 = \Phi_2 - 2\Phi_1; \quad (8)$$

$$w_0 = \frac{4}{3}w_1 - \frac{1}{3}w_2; \quad w_{-1} = \frac{8}{3}w_1 - \frac{8}{3}w_2 + w_3.$$

Число разбиений в методе конечных разностей  $n=20$  определено по принципу Рунге. Обоснование такого выбора приведено в статьях [16–18]. После сведения задачи (1)–(4) к нормальному виду первое уравнение задачи Коши будем решать методом Рунге–Кутты четвертого и шестого порядка точности по времени относительно функции прогиба  $w$ , используя на каждом шаге решение второго линейного алгебраического уравнения относительно функции усилия  $\Phi(r,t)$  методом обратной матрицы. Так как результаты, полученные методами 4-го и 6-го порядка точности, полностью совпадают [17], но время счета для метода Рунге–Кутты 4-го порядка в два раза меньше, то использовался метод Рунге–Кутты 4-го порядка. Шаг по времени выбирался по правилу Рунге.

Поперечная нагрузка может изменяться по любому закону в зависимости от координаты и времени. В данной работе исследовался характер колебаний оболочки, находящейся под действием поперечной знакопеременной нагрузки  $q=q_0 \sin(\omega_p t)$ , где  $q_0$  – амплитуда вынуждающей знакопеременной нагрузки;  $\omega_p$  – частота знакопеременной нагрузки.

Для исключения ошибочных результатов предварительно была сделана сходимость численных методов в зависимости от числа разбиений по пространственной и временной координате, а также сравнение решений, полученных методом Бунднова–Галеркина, и конечных разностей [16]. Это дает возможность рассматривать задачи как системы с бесконечным числом степеней свободы.

#### Исследование форм колебаний для жестко заземленной осесимметричной сферической оболочки

Исследуем колебания жестко опертой сферической оболочки (параметр пологости  $b=8$ , краевые условия (2)), находящейся под действием знакопеременной нагрузки  $q_0=\{0,01;0,17;0,21\}$ ,  $\omega_p=1,34$  – частота возбуждения, близкая к частоте собственных колебаний  $\omega_0$ . В таблице приведены спектр

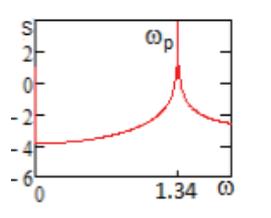
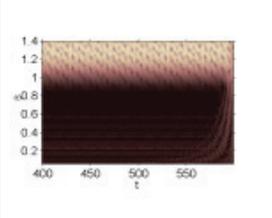
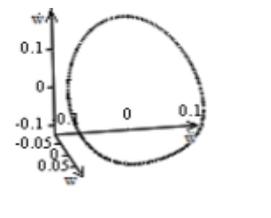
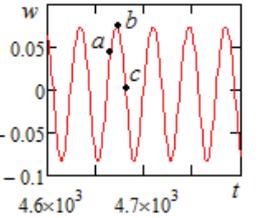
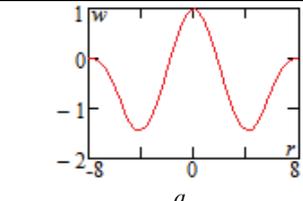
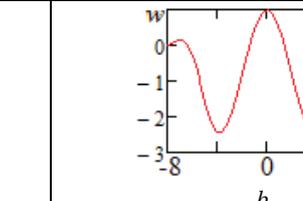
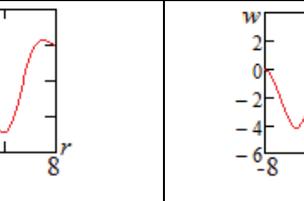
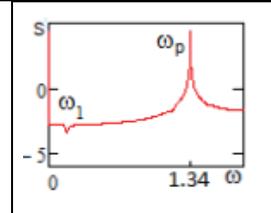
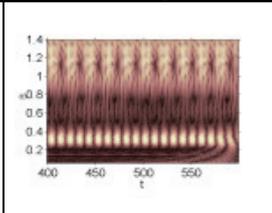
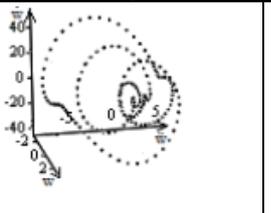
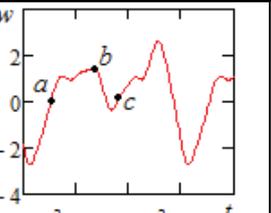
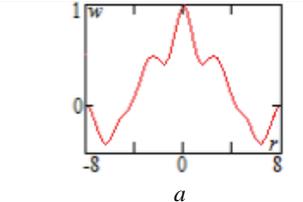
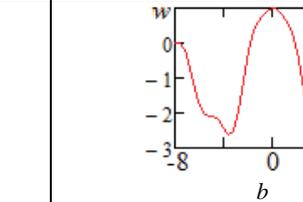
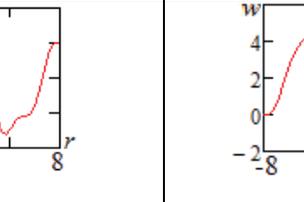
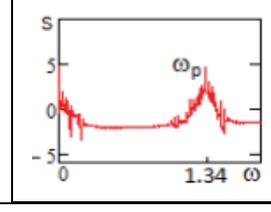
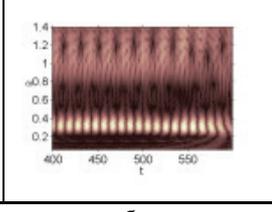
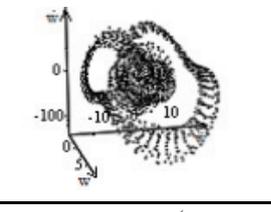
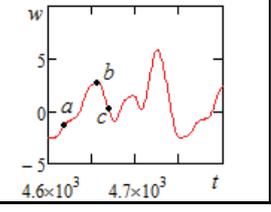
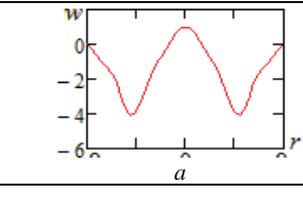
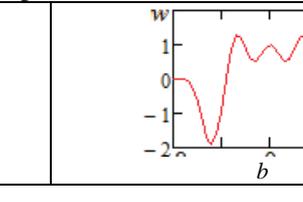
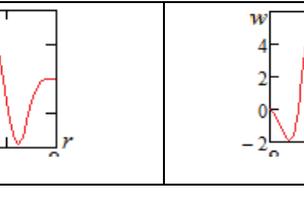
мощности, вейвлет-спектр Морле, эпюры прогибов и фазовые портреты, сигнал для центральной точки  $\omega(0;t)$ , первый ляпуновский показатель сигнала, рассчитанный по методу Вольфа [19]. Сигналы, получаемые в результате численных экспериментов при исследовании динамики распределенных механических систем, имеют амплитудно-временное представление. Но для глубокого понимания поведения динамических систем под действием той или иной нагрузки, для выявления причин того или иного явления необходима информация, скрытая в частотной области сигнала. Для оценки характера колебаний рассматриваемой системы в работе применялся аппарат вейвлет-преобразований [20, 21]. Вейвлет-анализ дает возможность отследить локализованные особенности сигнала во времени, а фурье-спектр отражает поведение сигнала на всем временном интервале. Однако с увеличением количества частот в спектре колебаний системы информативность вейвлет-преобразования снижается, так как на вейвлет-спектре гармоники сигналов с большей мощностью на частоте перекрываются с меньшей интенсивностью. Вейвлет-спектр сигнала, в свою очередь, серьезно зависит от материнского вейвлета, на основании которого он строится. В работе [22] приведено обоснование выбора вейвлета Морле в качестве материнского [23, 24], который дает лучшую локализацию как по времени, так и по частоте по сравнению с остальными материнскими вейвлетами. Следует отметить, что необходимо совместно анализировать фурье- и вейвлет-спектры.

Переход от гармонических колебаний к хаотическим происходит по сценарию Рюэля–Тakens–Ньюхауза, т. е. с увеличением амплитуды нагрузки появляется независимая частота и линейные комбинации двух частот: частоты возбуждения и независимой частоты. При  $q_0=0,01$  оболочка колеблется в гармоническом режиме: фазовый портрет представляет собой эллипс, первый ляпуновский показатель меньше нуля. На эпюрах прогиба видно два ребра, которые появляются при прогибе в центральной точке, близком к нулю. При увеличении амплитуды нагрузки до  $q_0=0,17$  появляются независимая частота, эпюры прогиба с двумя ребрами, при этом первый ляпуновский показатель чуть больше нуля. В вейвлет-спектре и спектре мощности появились независимая частота и линейные комбинации частоты возбуждения и независимой частоты. Дальнейшее увеличение амплитуды возбуждения приводит систему в состояние хаоса. На эпюрах прогиба уже три ребра, прогиб в центре оболочки близок к нулю. Исследования показали, что для жестко заземленной по контуру осесимметричной сферической оболочки переход колебаний из гармонических в хаотические происходит также по сценарию Рюэля–Тakens–Ньюхауза [25].

Таким образом, в эпюрах прогиба сферической оболочки с жестким защемлением при действии поперечной знакопеременной нагрузки было за-

**Таблица.** Характеристики колебаний осесимметричной оболочки

**Table.** Features of vibrations of axisymmetric shell

$q_0=0,01, LE=-1,342<0$			
Спектр мощности FFT	Вейвлет-спектр Wavelet spectra	Фазовый портрет Phase portrait	Сигнал Time histories
			
Эпюры прогиба в различные моменты времени (см. сигнал) Diagrams of deflection at different times (see time histories)			
			
$q_0=0,17, LE=0,0285 >0$			
Спектр мощности FFT	Вейвлет-спектр Wavelet spectra	Фазовый портрет Phase portrait	Сигнал Time histories
			
Эпюры прогиба в различные моменты времени (см. сигнал) Diagrams of deflection at different times (see time histories)			
			
$q_0=0,21, LE=0,1432 >0$			
Спектр мощности FFT	Вейвлет-спектр Wavelet spectra	Фазовый портрет Phase portrait	Сигнал Time histories
			
Эпюры прогиба в различные моменты времени (см. сигнал) Diagrams of deflection at different times (see time histories)			
			

фиксировано от одного до трех ребер. Сценарий Рюэля–Такенса–Ньюхауза влияет на появление ребер. Так, при гармонических колебаниях и на двух независимых частотах зафиксировано два ребра, а при наступлении хаоса – до трех ребер.

#### Заключение

В ходе численного эксперимента выявлено, что переход от гармонических колебаний к хаотическим для жестко заземленной сферической оболочки, находящейся под действием знакоперемен-

ной нагрузки, с частотой возбуждения, близкой к частоте собственных колебаний, происходит по сценарию Рюэля–Такенса–Ньюхауза.

Установлено, что количество ребер в эпоре оболочки зависит от характера колебаний оболочки: при гармонических и квазипериодических колебаниях зафиксировано два ребра, а при хаотических колебаниях количество ребер увеличивается до трех.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда № 16–19–10290.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диагностика заколонных перетоков газа комплексом высокоточной термометрии, спектральной шумометрии и импульсного нейтронного каротажа / А.М. Аслаян, И.Ю. Аслаян, Ю.С. Масленникова, Р.Н. Минахметова, С.В. Сорока, Р.С. Никитин, Р.Р. Кантоков // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2016. – № 6. – С. 52–59.
2. Линд Ю.В., Ишбулатова Р.Х., Хашпер А.Л. Вопросы автоматического распознавания каротажных диаграмм // Нефтегазовое дело. – 2015. – № 1. – С. 426–450.
3. Свердлов Г.М. Гидроакустические преобразователи и антенны. – Л.: Судостроение, 1988. – 197 с.
4. Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек. – М.: Наука, 1972. – 432 с.
5. Погорелов А.В. Геометрическая теория устойчивости оболочек. – М.: Наука, 1966. – 296 с.
6. Погорелов А.В. Изгибание поверхностей и устойчивость оболочек. – М.: Наука, 1986. – 96 с.
7. Григолюк Э.И., Кабанов В.В. Устойчивость оболочек. – М.: Наука, 1978. – 360 с.
8. Михасев Г.И., Товстик П.Е. Локализованные колебания и волны в тонких оболочках. Асимптотические методы. – М.: Физматлит, 2009. – 292 с.
9. Бабич В.М., Булдарев В.С. Асимптотические методы в задачах дифракции коротких волн. Метод эталонных задач. – М.: Наука, 1972. – 456 с.
10. Маслов В.П. Комплексный метод ВКБ в нелинейных уравнениях. – М.: Наука, 1977. – 384 с.
11. Колосов Г.И. Необходимые условия неустойчивости сферических оболочек при внешнем давлении // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2014. – № 3. – С. 90–95.
12. Устойчивость и предельные состояния упругопластических сферических оболочек при статических и динамических нагрузках / В.Г. Баженов, Е.Г. Гоник, А.И. Кибец, Д.В. Шопин // Прикладная механика и техническая физика. – 2014. – Т. 55. – № 1 (323). – С. 13–22.
13. Гаврюшин С.С. Численное моделирование процессов нелинейного деформирования тонких упругих оболочек // Математическое моделирование и численные методы. – 2014. – № 1 (1). – С. 115–130.
14. Michael J., Thompson T., Sieber J. Shock-Sensitivity in Shell-Like Structures: with Simulations of Spherical Shell Buckling // Int. J. Bifurcation Chaos. – 2016. – № 26. – 13 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1142/S0218127416300032>
15. Li K., Xun B., Hu W.R. Some bifurcation routes to chaos of thermocapillary convection in two-dimensional liquid layers of finite extent // Phys. Fluids. – 2016. – № 28. – 25 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4948400>
16. Awrejcewicz J., Krysko V.A., Papkova I.V. Dynamics and statics of flexible axially-symmetric shallow shells // Mathematical Problems in Engineering. – 2006. – V. 2006. – P. 27–51.
17. Deterministic Chaos in One Dimensional Continuous Systems / J. Awrejcewicz, V.A. Krysko, I.V. Papkova, A.V. Krysko. – Singapore: World Scientific, 2016. – 562 p.
18. Papkova I.V., Krysko V.A. Control of chaotic vibrations in flexible spherical shells // Mechanics of Solids. – 2006. – V. 41. – № 1. – P. 338–358.
19. Determining Lyapunov exponents from a time series / A. Wolf, J.B. Swift, H.L. Swinney, J.A. Vastano // Physica. – 1985. – V. D16. – P. 285–317.
20. Chui C.K., Wang J.Z. A cardinal spline approach to wavelets // Proc. Amer. Math. Soc. – 1991. – № 113. – P. 785–793.
21. Chui C.K., Wang J.Z. On compactly supported spline wavelets and a duality principle // Trans. Amer. Math. Soc. – 1992. – № 330. – P. 903–915.
22. Papkova I.V., Krysko V.A., Soldatov V.V. Analysis of nonlinear chaotic vibrations of shallow shells of revolution by using the wavelet transform // Mechanics of Solids. – 2010. – V. 45. – № 1. – P. 85–93.
23. Wave propagation and sampling theory. P. I: Complex signal and scattering in multilayer media / J. Morlet, G. Arens, E. Fourgeau, D. Giard // J. Geophys. – 1982. – № 47. – P. 203–221.
24. Wave propagation and sampling theory. P. II: Sampling theory and complex waves / J. Morlet, G. Arens, E. Fourgeau, D. Giard // J. Geophys. – 1982. – № 47. – P. 222–236.
25. Ruelle D., Takens F. On the nature of turbulences // Comm. Math. Phys. – 1971. – V. 20. – P. 167–192.

*Поступила 06.10.2016 г.*

#### Информация об авторах

**Мицкевич С.А.**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и системного анализа физико-технического факультета Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина.

**Папкина И.В.**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики и моделирования физико-технического факультета Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина.

**Захарова А.А.**, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой инженерной графики и промышленного дизайна Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Крысько А.В.**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной математики и системного анализа физико-технического факультета Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина; программист научно-учебной лаборатории 3D-моделирования кафедры инженерной графики и промышленного дизайна Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDK 539.3

## NONLINEAR DYNAMICS OF SPHERICAL HYDROACOUSTIC DEVICES USED IN OIL AND GAS INDUSTRY

**Svetlana A. Mitskevich<sup>1</sup>,**  
svetlana.mitskevich@gmail.com

**Irina V. Papkova<sup>1</sup>,**  
ikravzova@mail.ru

**Alena A. Zakharova<sup>2</sup>,**  
zaa@tpu.ru

**Anton V. Krysko<sup>1,2</sup>,**  
anton.krysko@gmail.com

**Svetlana A. Mitskevich<sup>1</sup>,**  
svetlana.mitskevich@gmail.com

<sup>1</sup> Yuri Gagarin Saratov State Technical University,  
77, Politekhnikeskaya street, Saratov, 410054, Russia.

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance of research.** Oil production is one of the most important industries in the Russian economy at present time. It depends to a large extent on the level of applied geophysical information and measurement systems on the basis of physical methods of obtaining information. The acoustic method is one of the leading ones in borehole geophysics. The amounts of using this method are about 10 % of all volume of well logging. The relevance of the study is caused by the need to improve the accuracy of the data obtained using acoustic logging. The effectiveness of the acoustic logging depends on the quality of the package of elastic waves. It is detected by the acoustic logging devices. The development of a mathematical model of the element motion in flexible spherical converter and study of the frequency characteristics of elastic vibrations are very important scientific and practical problems.

**The aim** of the research is to study the forced vibrations of a spherical transducer, which is a part of the acoustic logging.

**Results.** The authors have constructed the initial differential equations of motion of an axisymmetric spherical shell element using the variational principles and taking into account the geometric nonlinearity in the form of the Kirchhoff–Love and developed the algorithm for solving the systems of nonlinear differential equations using the finite difference method, the matrix and Runge–Kutta methods. Nonlinear vibrations of a spherical shell were analyzed based on non-linear dynamics and the qualitative theory of differential equations. It is shown that the dents in the vicinity of certain surface lines are possible in problems of nonlinear dynamics of axisymmetric spherical shells. It was found that the transition from harmonic vibrations to chaotic ones occurs according to the scenario of Ruelle–Takens–Newhouse for rigidly clamped spherical shell (excitation frequency is close to the natural frequency of the shell).

### Key words:

Dents, scripts of chaos appearance, axially symmetric spherical shell, transition from harmonic to random fluctuations, wavelet analysis, Ruelle–Takens–Newhouse scenario.

*The research was financially supported by the RNF Grant no. 16–19–10290.*

### REFERENCES

1. Aslanyan A.M., Aslanyan I.Yu., Maslennikova I.Yu., Minakhmetova R.N., Soroka S.V., Nikitin R.S., Kanyukov R.R. Diagnostika zakolonykh peretokov gaza kompleksom vysokotochnoy termometrii, spektralnoy shumometrii impulsnogo neytron-neutronnogo karotazha [Diagnosis of gas casing flow by a complex of precision thermometry, spectral sound meter and pulsed neutron-neutron logging]. *Territoriya «Neftegaz»*, 2016, no. 6, pp. 52–59.
2. Lind Yu.B., Ishbulatova R.Kh., Hashper A.L. Voprosy avtomaticheskogo raspoznavaniya karotazhnykh diagram [Issues in automatic recognition of logs diagrams]. *Neftegazovoe delo*, 2015, no. 1, pp. 426–450.
3. Sverdlin G.M. *Gidroakusticheskie preobrazovateli i anteny* [Hydroacoustic transducers and antennas]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1988. 197 p.
4. Volmir A.S. *Nelineynaya dinamika plastinok i obolochek* [Nonlinear dynamics of plates and shells]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 432 p.
5. Pogorelov A.V. *Geometricheskaya teoriya ustoychivosti obolochek* [Geometric theory of stability of shells]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 296 p.
6. Pogorelov A.V. *Isgibanie poverkhnostey i ustoychivost obolochek* [Deformation of surfaces and stability of shells]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 96 p.
7. Grigolyuk E.I., Kabanov V.V. *Ustoychivost obolochek* [Stability of shells]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 360 p.
8. Mikhasev G.I., Tovstik P.E. *Lokalizovannye kolebaniya i volny v tonkikh obolochkakh* [Localized Waves in thin shells. Asymptotic methods]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 292 p.
9. Babich V.M., Buldarev V.S. *Asimptoticheskie metody v zadachakh diffraksii korotkikh voln. Metod etalonnykh zadach*

- [Asymptotic methods for diffraction of short waves]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 456 p.
10. Maslov V.P. *Kompleksny metod VKB v nelineynykh uravneniyakh* [Complex WKB method for nonlinear equations]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 384 p.
  11. Kolosov G.I. Prerequisites of spherical shell instability under external pressure. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2014, no. 3, pp. 90–95. In Rus.
  12. Bazhenov V.G., Gonik E.G., Kibets A.I., Shoshin D.V. Stability and limit state of elastoplastic spherical shells under static and dynamic loadings. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2014, vol. 55, no. 1 (323), pp. 13–22. In Rus.
  13. Gavryushin S.S. Numerical modeling of nonlinear deformation of thin elastic shells. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennyye metody*, 2014, no. 1 (1), pp. 115–130. In Rus.
  14. Michael J., Thompson T., Sieber J. Shock-Sensitivity in Shell-Like Structures: with Simulations of Spherical Shell Buckling. *Int. J. Bifurcation Chaos.*, 2016, no. 26, 13 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1142/S0218127416300032>
  15. Li K., Xun B., Hu W.R. Some bifurcation routes to chaos of thermocapillary convection in two-dimensional liquid layers of finite extent. *Phys. Fluids*, 2016, no. 28, 25 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4948400>
  16. Awrejcewicz J., Krysko V.A., Papkova I.V. Dynamics and statics of flexible axially-symmetric shallow shells. *Mathematical Problems in Engineering*, 2006, vol. 2006, pp. 27–51.
  17. Awrejcewicz J., Krysko V.A., Papkova I.V., Krysko A.V. *Deterministic Chaos in One Dimensional Continuous Systems*. Singapore, World Scientific, 2016. 562 p.
  18. Papkova I.V., Krysko V.A. Control of chaotic vibrations in flexible spherical shells. *Mechanics of Solids*, 2006, vol. 41, no. 1, pp. 338–358.
  19. Wolf A., Swift J.B., Swinney H.L., Vastano J.A. Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica*, 1985, vol. D16, pp. 285–317.
  20. Chui C.K., Wang J.Z. A cardinal spline approach to wavelets. *Proc. Amer. Math. Soc.*, 1991, no. 113, pp. 785–793.
  21. Chui C.K., Wang J.Z. On compactly supported spline wavelets and a duality principle. *Trans. Amer. Math. Soc.*, 1992, no. 330, pp. 903–915.
  22. Papkova I.V., Krysko V.A., Soldatov V.V. Analysis of nonlinear chaotic vibrations of shallow shells of revolution by using the wavelet transform. *Mechanics of Solids*, 2010, vol. 45, no. 1, pp. 85–93.
  23. Morlet J., Arens G., Fourgeau E., Giard D. Wave propagation and sampling theory. P. I: Complex signal and scattering in multilayer media. *J. Geophys.*, 1982, no. 47, pp. 203–221.
  24. Morlet J., Arens G., Fourgeau E., Giard D. Wave propagation and sampling theory. P. II: Sampling theory and complex waves. *J. Geophys.*, 1982, no. 47, pp. 222–236.
  25. Ruelle D., Takens F. On the nature of turbulences. *Comm. Math. Phys.*, 1971, vol. 20, pp. 167–192.

Received: 6 Octobre 2016.

#### Information about the authors

**Svetlana A. Mitskevich**, Cand. Sc., associate professor, Yuri Gagarin Saratov State Technical University.

**Irina V. Papkova**, Cand. Sc., associate professor, Yuri Gagarin Saratov State Technical University.

**Alena A. Zakharova**, Dr. Sc., professor, head of the department, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Anton V. Krysko**, Dr. Sc., professor, Yuri Gagarin Saratov State Technical University; programmer, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 658.382.3

## ОСНОВЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ИНДУКЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Смирнов Геннадий Васильевич<sup>1</sup>,  
smirnov@main.tusur.ru

Смирнов Дмитрий Геннадьевич<sup>1</sup>,  
smirnov@main.tusur.ru

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

**Актуальность работы** обусловлена тем, что электрические машины применяются в большинстве производственных процессов разнообразных отраслей промышленности. Отказ электрической машины приводит к аварийным ситуациям, к простоем оборудования и, как следствие, к высоким экономическим затратам на ликвидацию результатов отказа машины. Особенно ощутимы результаты отказа электрических машин при разведке, добыче и транспортировке георесурсов в нефтедобывающей, горнорудной, угольной, химической и других отраслях промышленности, так как эти отрасли в настоящее время являются основой формирования бюджета страны. Надежность и безотказность работы этих машин зависит от состояния витковой изоляции, роль которой играет эмалевая изоляция обмоточных проводов, поэтому совершенствование контроля эмалевой изоляции обмоточных проводов, повышение их качества является весьма злободневным.

**Цель работы:** изучение возможности использования электромагнитной индукции для неразрушающего контроля эмалевой изоляции обмоточных проводов.

**Методы исследования:** электромагнитные, для генерирования и исследования характеристик сигнала контактного первичного преобразователя дефектов; микрометрические, для определения геометрических размеров дефектов в эмалевой изоляции и сопоставления их с результатами контроля.

**Результаты.** Исследованы возможности применения контактных датчиков дефектов для контроля изоляции обмоточных проводов при использовании наведенной ЭДС в качестве сигнала в жиле контролируемого провода. Разработан способ контроля дефектности эмалевой изоляции проводов, позволяющий определять количество и протяженность дефектных участков движущегося в ней с любыми переменными скоростями провода. Предложена схема измерителя дефектности, и рассмотрен принцип его работы. Выявлена систематическая погрешность при контроле протяженности дефектов, обусловленная конечными размерами датчика дефектов, и приведен способ её устранения.

### Ключевые слова:

Эмалевая изоляция, дефект, датчик дефектов, индукция, генератор наводки, потенциал, импульс с дефекта, протяженность, частота, датчик скорости.

### Введение

В настоящее время основная доля отказов электроприводов общепромышленного применения, в частности горнодобывающего и нефтепромыслового оборудования, связана с дефектами в витковой изоляции обмоток [1–9], роль которой выполняет эмалевая изоляция обмоточных проводов. Готовые эмалированные провода проходят многочисленные лабораторные испытания [10–15]. Слой изоляции на проводах не является идеально однородным. Существуют небольшие дефекты, трещины и микроотверстия, которые делают возможным контакт окружающей атмосферы и металлической жилы. Дефектность изоляции обмоточных проводов является основной причиной отказа обмоток электрических машин [7], поэтому необходимо осуществлять контроль дефектности проводов не только на стадии их производства, но и в процессе изготовления из них намоточных изделий [16]

В настоящее время для контроля дефектности эмалевой изоляции проводов используют ГОСТ ИЕС 60851–5–2011 [17]. В соответствии с этим документом целостность изоляции выражается числом точечных повреждений на проводе определенной длины, зафиксированных с помощью элек-

трического испытательного устройства. Точечные повреждения для проводов с жилой номинальным диаметром до 0,050 мм включительно определяют при низком напряжении при помощи датчика, состоящего из двух фетровых пластин, погруженных в раствор водного сернокислого натрия  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (концентрация 30 г/л), между которыми со скоростью  $(275 \pm 25)$  мм/с протягивается контролируемый провод. При этом между жилой провода и раствором, соединенными в электрическую цепь, прикладывают испытательное напряжение постоянного тока  $(50 \pm 3)$  В. Точечные повреждения фиксируют соответствующим реле со счетчиком.

Для проводов с диаметром жилы, лежащей в диапазоне от 0,050 до 0,25 мм используют электрод-датчик, выполненный в виде двух роликов. Контролируемый провод протягивается через датчик, образованный 4 роликами, два из которых являются направляющими, а два других – электродами датчика. Для проводов с диаметром, лежащим в диапазоне от 0,25 до 1,60 мм, этот датчик уже не применим, и взамен него используют один высоковольтный электрод большего диаметра. При таком контроле провод многократно перегибается. Это приводит к высоким механическим

нагрузкам на изоляцию провода со стороны роликов, что вызывает не только ослабление механической и электрической прочности изоляции контролируемого провода, но и к появлению дополнительных дефектов в изоляции провода.

Рассмотренные выше способы контроля дефектности не позволяют определять протяженность дефектов, которая является не менее важной характеристикой поврежденности изоляции, чем количество дефектов [16].

Основным же недостатком известных способов контроля, как с контактными, так и бесконтактными датчиками дефектов, является необходимость заземления жилы контролируемого провода. Для заземления жилы очищают один конец контролируемого провода от эмалевой изоляции и подсоединяют его к земле. Поскольку при контроле провод перемещается, то заземление его жилы на практике реализовать не всегда возможно. Такая ситуация возникает, в частности, если контроль происходит при сматывании провода с катушки, где не всегда имеется доступ к концу провода, находящегося внутри катушки. В том случае, когда жилу провода можно заземлить, конец провода необходимо очистить от эмалевой изоляции и подсоединить его к заземленному источнику провода, что усложняет реализацию способа. Кроме того, при заземленной жиле провода и применении высоковольтных газоразрядных бесконтактных датчиков дефектов может произойти пробой и дополнительное разрушение изоляции провода, делаю его непригодным для использования в обмотках электрических изделий.

Использование же контактных фетровых датчиков, смоченных подсоленной водой (электролитом) загрязняет поверхность изоляции и делает её также мало пригодной для использования в намоточных изделиях. Поэтому способы, основанные на применении упомянутых видов датчиков, следует считать разрушающими. В связи с этим вышеупомянутый стандарт применяют только для выборочного контроля на отрезках провода длиной (301) м.

Указанные недостатки стимулировали поиск более универсальных и точных способов и устройств контроля дефектности изоляции проводов.

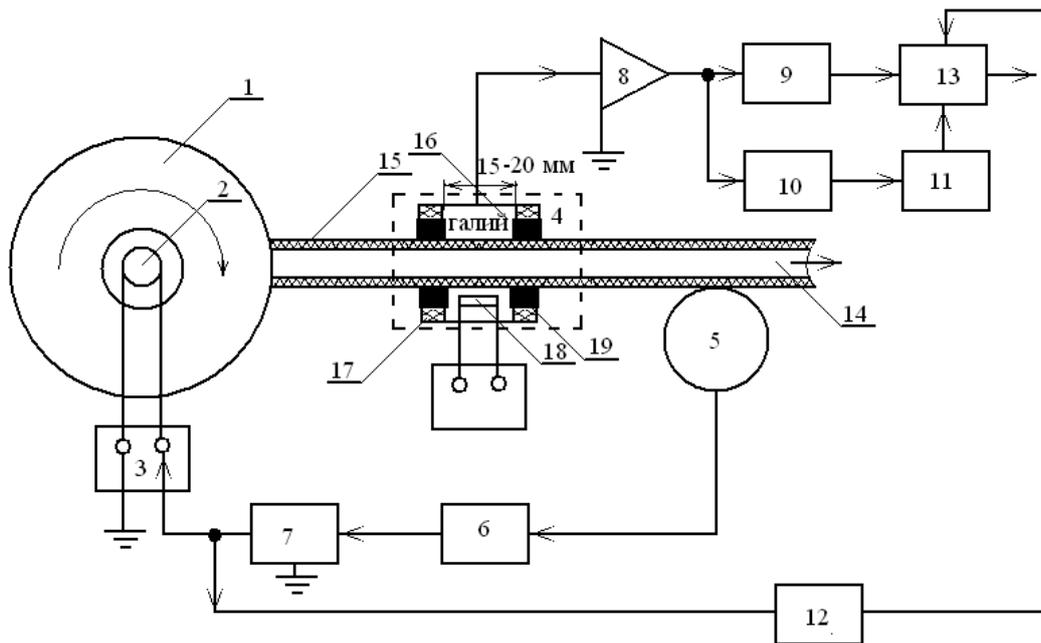
#### **Обоснование индукционного способа и его реализации**

В работе [16] подробно изложены основы контроля дефектности с использованием высоковольтного газоразрядного датчика дефектов, устраняющие основные недостатки контроля, предписанного стандартом [17]. Несмотря на все достоинства способа контроля [16], он имеет ряд своих недостатков. Основным из них является необходимость использования высокого напряжения на датчике, что может привести к нестабильностям времени загорания и погасания разряда при подходе и выходе дефектного участка изоляции из зоны действия датчика дефектов. Это вносит определен-

ные сложности при контроле не только количества, но и протяженности дефектов. Поиск путей контроля дефектов, свободных от этого недостатка, позволил нам обнаружить возможность регистрации дефектов в изоляции движущегося провода вообще без подачи питающего напряжения на датчик дефектов. Такая возможность была выявлена при протягивании контролируемого провода с незаземленной жилой через контактный датчик, выполненный из проводящей резины [18]. Выход упомянутого датчика был подключен к входу осциллографа. При прохождении дефектного участка жилы через датчик на экране осциллографа появлялся импульсный сигнал. Причина этого заключалась в том, что в любом помещении, использующем переменное напряжение 50 Гц, вокруг проводов возникает переменное электромагнитное поле указанной частоты. Это поле индуцирует в контролируемом проводе ЭДС, и на его жиле возникает переменный электрический потенциал. Датчик из проводящей резины, обжимающий провод, при прохождении через него дефектного участка изоляции соприкасается с жилой провода. Наведенный в ней потенциал через датчик передается на вход осциллографа, где и регистрируется в виде импульса.

Выявленный процесс позволил создать принципиально отличающийся от известных индукционный способ контроля дефектов [19]. Если бы было необходимо регистрировать только количество дефектов в контролируемом проводе, как это следует из стандарта [17], то в реализации упомянутого контроля достаточно было бы ограничиться сетевой наводкой, возникающей в окружающей среде от протекающего по электрической сети тока промышленной частоты. В частности, использование сетевой наводки с применением датчика из проводящей резины показало нам возможность создания предлагаемого индукционного контроля. Однако в разрабатываемом способе предусматривается возможность помимо количества дефектов контролировать и их протяженность, независимо от того, с какой скоростью протягивается контролируемый провод через датчик дефектов. Учитывая этот факт, в измеритель дефектности потребовалось ввести генератор, частота которого изменяется пропорционально скорости провода. Схема устройства, реализующего этот способ, приведена на рис. 1.

Сущность предлагаемого контроля заключается в следующем. При контроле дефектности (рис. 1) провод сматывают с катушки 1, закрепленной на оси 2. Генератором 7 индуктора генерируются периодически изменяющиеся во времени импульсы, которые излучаются индуктором 3. За счет индуктивной и емкостной связи между катушкой индуктора 6 и катушкой 1 контролируемого провода в последней, а, следовательно, в проводе 14 индуцируется периодически изменяющаяся во времени ЭДС. При этом если скорость провода в процессе контроля изменяется, то пропорционально ей из-



**Рис. 1.** Схема устройства контроля дефектов и эпюры сигналов: 1 – катушка контролируемого провода; 2 – ось катушки; 3 – индуктор; 4 – датчик точечных повреждений; 5 – датчик скорости; 6 – электронный блок; 7 – генератор индуктора; 8 – высокоомный усилитель; 9 – счетчик протяженности дефектов; 10 – низкочастотный фильтр; 11 – счетчик количества дефектов; 12 – счетчик длины проконтролированного провода; 13 – арифметический блок; 14 – жила провода; 15 – эмаль-изоляция провода; 16 – галлий; 17 – корпус датчика точечных повреждений; 17 – уплотнитель; 18 – нагревательный элемент; 19 – терморегулятор

**Fig. 1.** Diagram of the device for controlling defect and plot of signals: 1 is the coil of the controlled wire; 2 is the coil axis; 3 is the inductor; 4 is the point damage sensor; 5 is the speed sensor; 6 is the electronic unit; 7 is the inductor generator; 8 is the high impedance amplifier; 9 is the meter of defects length; 10 is the low-pass filter; 11 is the defects counter; 12 is the meter of the controlled wire length; 13 is the arithmetic unit; 14 is the wire core; 15 is the wire enamel insulation; 16 is the gallium; 17 is the case of the sensor of point damage; 17 is the gasket; 18 is the heating element; 19 is the thermostat

меняется частота и, следовательно, изменяется длительность периода одного наведенного колебания ЭДС, но обратно пропорционально скорости движения провода. Этот факт наглядно демонстрирует эпюра А на рис. 2.

Действительно, если скорость провода изменяется, например, как показано на упомянутой эпюре, в диапазоне от 0,5 до 2 В, то частота индуцированной ЭДС и длительность одного периода  $T$  наведенной ЭДС также изменяются, но от 2 до 0,5 Т.

Когда через датчик точечных повреждений 4 проходят бездефектные участки эмалевого изоляции провода 15, на вход высокоомного усилителя 8 сигнал не поступает. При прохождении через датчик точечных повреждений дефектного участка изоляции жила провода 14 через контактный датчик точечных повреждений 4 и входное сопротивление высокоомного усилителя 8 подключается к общей точке (земле), которую также имеет и генератор 7 индуктора. Поскольку в жиле провода индуцируется ЭДС, то эта ЭДС поступает на вход высокоомного усилителя 8 и на его выходе появляется усиленный сигнал в виде серии импульсов наведенной ЭДС (рис. 2, эпюра В). Этот сигнал поступает на счетчик протяженности дефектов 9, где регистрируется количество периодов наведенной ЭДС. При этом если протягивать один и тот же де-

фектный участок с фиксированной протяженностью через датчик точечных повреждений с различными скоростями, то независимо от скорости протягивания количество зарегистрированных импульсов, поступающих в счетчик 9, остается неизменным (для примера на рис. 2, эпюра В, показано, что при изменении скорости провода от 0,5 до 2 В в счетчик протяженности дефектов при прохождении одного и того же дефекта через датчик точечных повреждений поступает одно и то же количество импульсов, равное 3.

Одновременно этот сигнал поступает на вход низкочастотного фильтра 10 и на его выходе появляется импульс длительностью, равной времени прохождения поврежденного участка изоляции провода через датчик точечных повреждений (рис. 2, эпюра Д). Длительность каждого импульса обратно пропорциональна скорости провода, но всегда равна времени прохождения дефектным участком через датчик 4 точечных повреждений. Этот сформированный импульс поступает на вход счетчика количества дефектов 11, где и регистрируется. Количество  $K$  зарегистрированных счетчиком 11 импульсов при контроле провода равняется количеству  $K$  дефектов на этом проводе. По суммарному количеству периодов наведенной ЭДС, зарегистрированных счетчиком протяженности дефек-

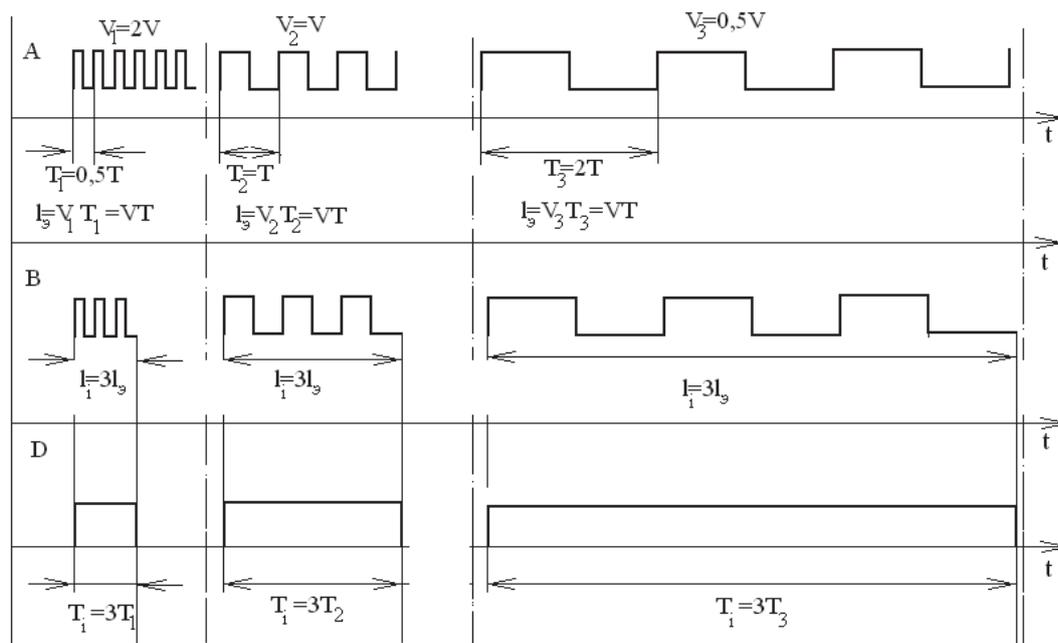


Рис. 2. Эпюры сигналов

Fig. 2. Diagrams of signals

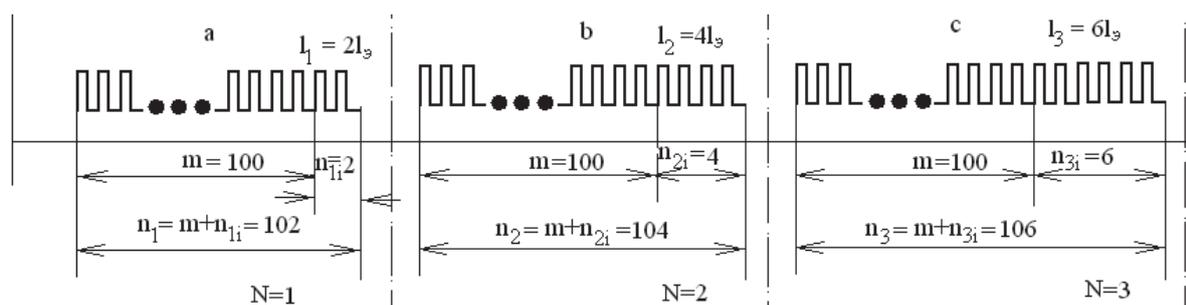


Рис. 3. Эпюры сигналов, иллюстрирующие пример реализации способа контроля дефектности

Fig. 3. Diagrams of signals illustrating an example of implementation of the defects controlling method

тов 9, и по количеству зарегистрированных импульсов в счетчике 11 можно определить протяженность поврежденных участков изоляции провода. Изменение скорости протягивания провода приводит к существенным погрешностям при определении протяженности дефектов. Чтобы этого не происходило, в цепи управления генератором 7 индуктора находится датчик 5 скорости и электронный блок 6, управляющий периодом наведенной в жиле провода 14 ЭДС. Датчик скорости 5 механически связан с контролируемым проводом, сматываемым с катушки 1 контролируемого провода. При увеличении скорости провода увеличивается частота наводимого датчиком скорости 5 сигнала. Сигнал с датчика 5 скорости через электронный блок 6 поступает на генератор 7 индуктора и на индуктор 3. Для того чтобы определить протяженность любого дефектного участка, общую длину всех выявленных дефектных участков на эмалевой изоляции контролируемого провода и

длину проконтролированного провода, необходимо предварительно откалибровать измерительное устройство. При калибровке следует определить принятую за единицу измерения элементарную длину провода  $l_0$ , которая проходит через датчик 4 точечных повреждений и датчик скорости 5 за один период ЭДС, индуцированной индуктором 3 в жиле провода 14. Величина  $l_0$  зависит от конструкции датчика скорости 5, схемы электронного блока 6 и схемы генератора индуктора 7. Поэтому для любой конкретной схемы, реализующей предлагаемый способ, необходимо экспериментально определить эту величину  $l_0$ . Для этой цели отмеряют некоторый отрезок  $l_0$  провода любыми точными измерителями длины и регистрируют количество импульсов скорости  $n$ , пришедших в счетчик длины проконтролированного провода 12 при протягивании этого отрезка через датчик скорости 5. По результатам измерений определяют элементарную протяженность провода  $l_0$  по формуле

$$l_3 = \frac{l_\Phi}{n}. \quad (1)$$

Определенную по формуле (1) величину  $l_3$  принимают за единицу меры протяженности дефекта и длины проконтролированного провода. Эта величина при любых скоростях движения провода остается неизменной, что наглядно представлено на рис. 2, эпюра А. Таким образом, благодаря наличию датчика скорости 5 результат измерения одного и того же по протяженности дефектного участка остается постоянным, независимо от того, с какой скоростью движется провод (рис. 2, эпюра В).

#### Систематическая погрешность и критерии оценки качества изоляции проводов

Казалось бы, что если в счетчике 9 протяженности дефектов при прохождении любого  $i$ -го дефекта через датчик точечных повреждений 4 зарегистрировано  $n_i$  импульсов (периодов индуцированной ЭДС), то протяженность  $l_i$  этого дефекта может быть определена по формуле

$$l_i = n_i l_3. \quad (2)$$

Однако в реальности количество зарегистрированных периодов  $n_i$  индуцированной ЭДС в счетчике протяженности дефектов 9 за время прохождения под датчиком точечных повреждений 4  $i$ -го дефекта не точно определяет его протяженность  $l_i$  по формуле (2). Это происходит потому, что датчик точечных повреждений имеет вполне реальную конечную протяженность контакта с поверхностью контролируемого провода и это вносит систематическую погрешность в определение протяженности каждого дефектного участка. Для пояснения сущности возникающей упомянутой выше систематической ошибки допустим, что через датчик точечных повреждений проходит точечный дефект бесконечно малой протяженности. За время прохождения этого участка через датчик точечных повреждений счетчик протяженности дефектов 9 зарегистрирует  $m$  импульсов ( $m$  периодов наведенной ЭДС, рис. 2). Кажущаяся протяженность этого бесконечно малого точечного дефекта, в соответствии с выражением (2), равна:  $\Delta l = l_3 m$ . Иными словами, конечная протяженность датчика точечных повреждений вносит систематическую ошибку в определение протяженности дефектов и ее необходимо исключить. Для исключения этой ошибки необходимо определить число  $m$  ложных импульсов, обусловленных конечными размерами датчика точечных повреждений. Для определения количества  $m$  ложных импульсов нанесем на провод два дефекта с отличающимися друг от друга, но четко измеренными при помощи точных мер длины протяженностями дефектных участков  $l_1$  и  $l_2$  и протянем эти участки провода через датчик точечных повреждений 4 и датчик скорости 5. Пусть протяженность первого дефекта в  $N$  раз меньше, чем протяженность второго участка. Предположим, что при прохождении этих двух участков через датчик точечных повреждений и датчик скорости

сти счетчик протяженности дефектов 9 регистрирует  $n_1$  и  $n_2$  импульсов индуцированной ЭДС с каждого дефекта соответственно (рис. 3). Так как в каждом из зарегистрированных количеств импульсов  $n_1$  и  $n_2$  помимо истинных импульсов  $n_{1i}$  и  $n_{2i}$ , определяющих протяженность каждого из дефектов, содержатся и  $m$  ложных импульсов, зависящих от размеров датчика, то можно записать систему уравнений:

$$n_1 = n_{1i} + m, \quad (3)$$

$$n_2 = n_{2i} + m = N n_{1i} + m. \quad (4)$$

Решив систему уравнений относительно величины  $m$ , получим:

$$m = \frac{n_1 N - n_2}{N - 1}. \quad (5)$$

Пусть через датчик точечных повреждений проходит дефект известной протяженности  $l_i$ . При прохождении этого дефекта через датчик точечных повреждений 4 в счетчике протяженности дефектов 9 регистрируются  $n_j$  импульсов индуцированной в проводе ЭДС (рис. 3).

Истинная протяженность одного дефекта  $l_i$  с учетом ложных  $m$  импульсов, зарегистрированных счетчиком 10, может быть рассчитана по формуле

$$l_i = (n_j - m) \cdot l_3 = \left( n_j - \frac{n_1 N - n_2}{N - 1} \right) \cdot l_3. \quad (6)$$

При прохождении контролируемого провода через датчик 4 точечных повреждений счетчик количества дефектов 11 регистрирует количество дефектов, равное  $K$ . Истинная протяженность поврежденной изоляции контролируемого провода, с учетом количества подсчитанных на контролируемом проводе дефектов  $K$  и формулы (6), равна:

$$l_{\text{сум}} = l_3 = \left[ \sum_{i=1}^K n_i - K \frac{n_1 N - n_2}{N - 1} \right]. \quad (7)$$

Таким образом, для определения истинной суммарной протяженности поврежденной изоляции  $l_{\text{сум}}$  необходимо регистрировать общее количество дефектов  $K$  на контролируемом проводе счетчиком количества дефектов и количество периодов  $n_i$  наведенной ЭДС счетчиком протяженности дефектов и общую протяженность дефектов в изоляции контролируемого провода определять по формуле (7).

Для более точной оценки качества каждого из контролируемых проводов необходимо еще знать длину проконтролированного провода  $l_{\text{пр}}$  и найти поврежденность изоляции провода на единицу его длины. Для этой цели служит счетчик 12 (рис. 1) длины проконтролированного провода, с помощью которого подсчитывают общее количество  $n_{\text{пр}}$  периодов наведенной ЭДС за время контроля провода. Длину проконтролированного провода определяют по формуле

$$l_{\text{пр}} = n_{\text{пр}} l_3. \quad (8)$$

По результатам всех измерений можно оценить качество эмалевой изоляции провода по двум параметрам, позволяющим более точно оценить каче-

ство эмалевой изоляции контролируемого провода: по количеству дефектов  $K_1$ , приходящихся на единицу длины проконтролированного провода, и по среднестатистической протяженности дефектов  $K_2$ , приходящихся на единицу длины проконтролированного провода:

$$K_1 = \frac{K}{l_{\text{пр}}}, \quad (9)$$

$$K_2 = \frac{l_{\text{сум}}}{l_{\text{пр}}}. \quad (10)$$

Подсчет всех этих качественных параметров осуществляется в арифметическом блоке 13 (рис. 1).

#### Возможные варианты датчиков дефектов для индукционного способа контроля

В соответствии с нормативным документом [17] в качестве контактного датчика для непрерывного контроля изоляции проводов используют две фетровые пластины, погруженные в водный раствор сернокислого натрия  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (концентрация 30 г/л). При этом между жилой провода и раствором, соединенных в электрическую цепь, прикладывают испытательное напряжение постоянного тока ( $50 \pm 3$ ) В при разомкнутой цепи. В соответствии с этим способом при помощи упомянутого датчика определяют целостность изоляции, которая выражается числом точечных повреждений изоляции провода, зафиксированных с помощью электрического испытательного устройства.

Точечные повреждения фиксируют соответствующим реле со счетчиком. Счетчик должен срабатывать при сопротивлении изоляции провода менее 10 кОм в течение не менее 0,04 с. Счетчик не должен срабатывать при сопротивлении 15 кОм и более. Цепь для определения повреждений должна работать со скоростью срабатывания ( $5 \pm 1$ ) мс, обеспечивая регистрацию с частотой ( $500 \pm 25$ ) повреждений в минуту при протягивании провода без изоляции.

Недостаток указанного датчика заключается в том, что, во-первых, электролитический состав в течение работы может изменять свою концентрацию, а его электропроводимость зависит от температуры контроля, что влечёт за собой изменение сопротивления в контакте между датчиком точечных повреждений и влияет на точность и информативность контроля. Кроме того, чувствительность датчика низка, поэтому его используют только для контроля изоляции тонких проводов, диаметр которых не превышает 0,5 мм.

Известен также датчик для непрерывного контроля изоляции проводов, описанный в [18].

Датчик (рис. 4) содержит расширительный элемент 1, формирующую обойму 2, нагреватель 3, проводящий эластичный обжим 4, источник света 5, фотоэлектрический преобразователь 6, контролируемый провод 7, преобразователь фотоэлектрического тока в напряжение 8, управляемый источник

тока 9, причем расширительный элемент расположен внутри расточки обоймы, обжим находится внутри отверстия в расширительном элементе, источник света и фотоэлектрический преобразователь расположены внутри обоймы, по разные стороны от обжима. Преобразователь 6 соединен с входом преобразователя 8, выход которого соединен с источником 9. Источник 9 соединен с входом нагревателя 3.

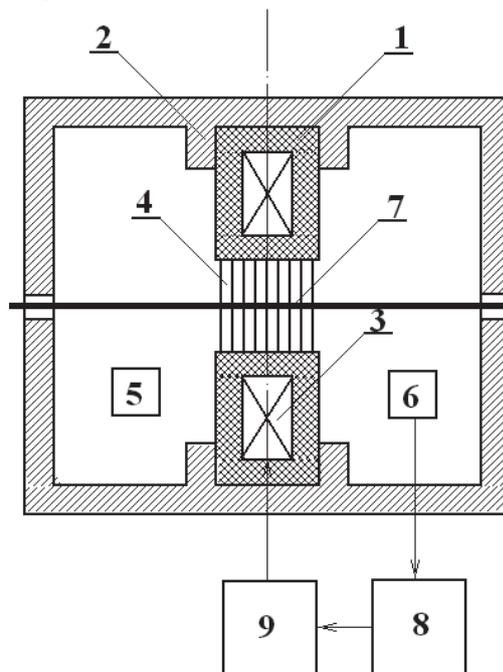


Рис. 4. Конструкция и схема регулирования параметров датчика дефектов на основе проводящей резины: 1 – расширительный элемент; 2 – формирующая обойма; 3 – нагреватель; 4 – проводящий эластичный обжим; 5 – источник света; 6 – фотоэлектрический преобразователь; 7 – контролируемый провод; 8 – преобразователь фотоэлектрического тока в напряжение; 9 – управляемый источник тока

Fig. 4. Design and scheme of controlling the parameters of defects sensor, based on conductive rubber: 1 is the expanding element; 2 is the forming clip; 3 is the heater; 4 is the conductive elastic crimp; 5 is the light source; 6 is the photoelectric converter; 7 is the controlled cable; 8 is the transducer of the photoelectric current voltage; 9 is the controlled current source

Датчик работает следующим образом. Контролируемый провод протягивается через отверстие в обжиме, который плотно прилегает к поверхности провода. При появлении зазора между поверхностью провода и обжимом возникает световой поток, проходящий через этот зазор от источника света 5. Световой поток попадает на преобразователь 6 и вызывает протекание через него электрического тока. Преобразователь 8 преобразует этот ток в напряжение, управляющее источником 9. Ток источника 9, при возрастании напряжения на выходе преобразователя 8, увеличивается и, протекая через нагреватель 3, вызывает рост температуры в расширительном элементе 1, приводя к его

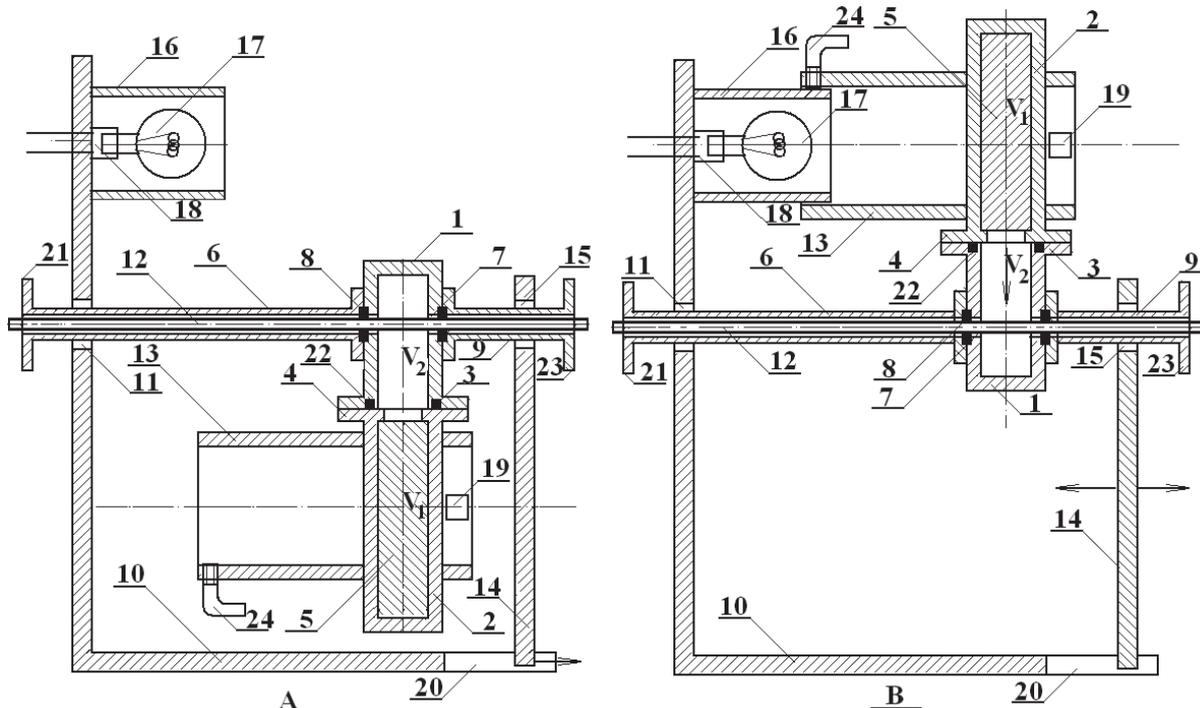
расширению. Ввиду того, что обойма 2, в которую вставлен элемент 1, препятствует увеличению его внешнего диаметра, происходит уменьшение его внутреннего диаметра. При этом обжим поджимается к поверхности провода 7 и зазор уменьшается. В результате уменьшается световой поток, попадающий через зазор от источника света 5 на преобразователь 6. Ток, протекающий через преобразователь, уменьшается. На это уменьшение реагирует преобразователь 8, который уменьшает ток источника 9, протекающий через нагреватель 3.

Недостатком датчика является сложность его конструкции, малая надежность и долговечность, низкая точность и чувствительность.

В значительной мере указанные недостатки устраняет датчик, приведенный в работе [19, 20].

На рис. 5 и 6 приведена конструкция датчика и принципиальная схема, служащие для пояснения принципа его работы. Датчик (рис. 5) состоит из корпуса 1, колпака 2, рабочего элемента (галлия) 5, греющего источника 17 с плавно изменяющейся мощностью, термодатчика 19, трубы кожуха 13, схемы регулирования мощности греющего источника 25 (рис. 6), стойки с платформой 10 и подвижной стойки 14. Корпус 1 и колпак 2 выполнены из теплопроводящего материала (меди) в виде

перевернутых в вертикальной плоскости на  $180^\circ$  по отношению друг к другу прямоугольных сосудов, по периметру которых в верхней торцевой части корпуса 1 и в нижней части колпака 2 выполнены одинаковые по конфигурации фланцы 3 и 4. Внешние размеры фланцев 3 и 4 одинаковы. Внутренний размер фланца 4 колпака 2 меньше внутреннего размера фланца 3 корпуса 1. Во фланце корпуса 1 выточена проточка, в которую вставлен уплотнитель 22. Корпус 1 и колпак 2 идентичны по конфигурации, но объем внутренней полости колпака  $V_1$  больше объема  $V_2$  внутренней полости корпуса 1. Объем  $V_1$  полностью заполнен галлием 5. Фланцы корпуса 1 и колпака 2 присоединены друг к другу крепежными деталями. В стенках корпуса 1 просверлены сквозные соосные отверстия 7, вокруг которых с внешней стороны корпуса 1 выполнены проточки. В упомянутые проточки вставлены уплотняющие манжеты 8. С противоположных внешних сторон корпуса датчика 1 прикреплены две трубчатые оси 6 и 9, имеющие с обоих торцов фланцы. Одними торцевыми фланцами оси прикреплены крепежными деталями к корпусу датчика 1. Другие торцевые фланцы осей 21 и 23 являются ограничителями продольных перемещений. Уплотняющие манжеты 8 находятся между корпу-



**Рис. 5.** Конструкция датчика контроля изоляции проводов в нерабочем (А) и рабочем (В) состоянии: 1 – корпус; 2 – колпак; 3 и 4 – фланцы; 5 – рабочий элемент (галлий); 6 и 9 – трубчатые оси греющего источника; 7 – уплотнительные манжеты; 8 – сквозные соосные отверстия; 10 – стойка с платформой; 11 – отверстие; 12 – контролируемый провод; 13 – труба кожуха; 14 – подвижная стойка; 15 – отверстие; 16 – труба; 17 – греющий источник; 18 – патрон; 19 – термодатчик; 20 – паз; 21 и 23 – ограничители оси; 22 – уплотнитель; 24 – греющий источник

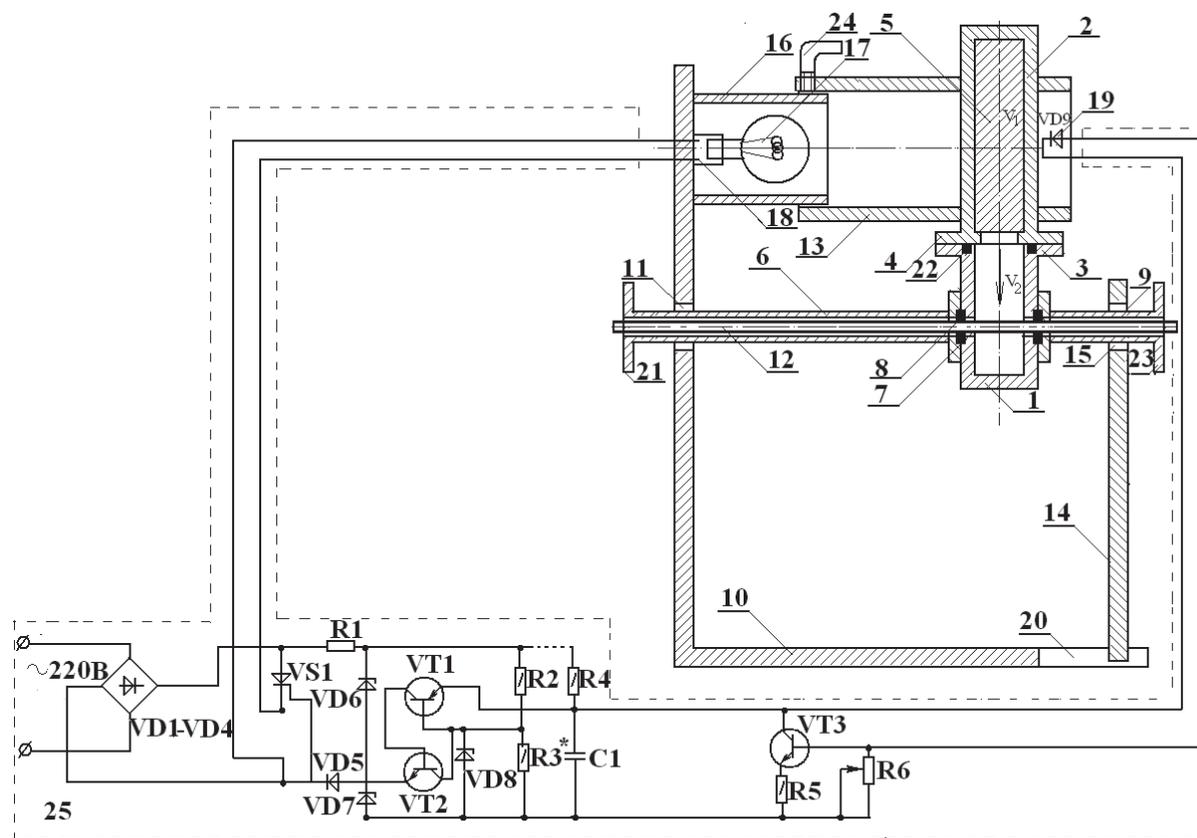
**Fig. 5.** Design of the sensor for controlling wire insulation in idle (A) and operating (B) states: 1 is the body; 2 is the cap; 3 and 4 are the flanges; 5 is the working element (gallium); 6 and 9 are the tubular axes of heating source; 7 are the sealing cups; 8 are the end-to-end coaxial holes; 10 is the stand with a platform; 11 is the hole; 12 is the controlled cable; 13 is the casing pipe; 14 is the movable stand; 15 is the eye; 16 is the pipe; 17 is the heater; 18 is the cartridge; 19 is the temperature sensor; 20 is the groove; 21, 23 are the axis limiters; 22 is the gasket; 24 is the heating source

сом 1 и фланцами трубчатых осей 6 и 9. Внутренний диаметр трубчатых осей соответствует диаметру просверленных в корпусе 1 отверстий.

Наружный диаметр этих осей соответствует отверстию 11 в стойке 10. Трубчатая ось 6 входит в отверстие 11 стойки с платформой 10, а ось 9 входит в отверстие 15 подвижной стойки 14. Фланцы – ограничители осей 21 и 23 – расположены с противоположной от датчика стороны отверстий 11 и 15. Отверстие 11 в стойке с основанием 10 соосно отверстию 15 в подвижной стойке 14. Нижний конец подвижной стойки 14 расположен в пазу 20 платформы стойки с платформой 10 и может перемещаться в продольном направлении по расположенным внутри паза направляющим. К верхней части стойки платформы закреплена труба 16, выполненная из меди. Внутри трубы по её центральной оси к стойке с платформой 10 прикреплен патрон 18, в который вкручен греющий источник 17 с плавно изменяющейся мощностью.

К внешней стороне колпака 2 одним из торцов прикреплена труба кожуха 13, внутренний диаметр которой соответствуют внешнему диаметру трубы 16, прикрепленной к верхней части стойки с платформой 10. Труба кожуха 13 имеет отверстие с резьбой, в которое вкручен резьбовой фиксатор 24, оси вращения упомянутых труб 13 и 16 совпадают. С противоположной стороны корпуса 1 от трубы кожуха 13 расположено гнездо, в которое вставлен термодатчик 19, выход которого соединен с входом схемы регулирования мощности греющего источника 24 (рис. 6), выход которой соединен с входом греющего источника 17 с плавно изменяющейся мощностью.

Датчик работает следующим образом. В исходном состоянии имеет вид, изображенный на рис. 5, А. Рабочий элемент – галлий 5 полностью заполняет объем  $V_1$  внутренней полости колпака 4, и галлий в этой полости находится в твердом состоянии. Заполняют эту полость расплавленным галлием



**Рис. 6.** Схема автоматического регулирования температуры в датчике: 1 – корпус; 2 – колпак; 3 и 4 – фланцы; 5 – рабочий элемент (галлий); 6 и 9 – трубчатые оси греющего источника; 7 – уплотнительные манжеты; 8 – сквозные соосные отверстия; 10 – стойка с платформой; 11 – отверстие; 12 – контролируемый провод; 13 – труба кожуха; 14 – подвижная стойка; 15 – отверстие; 16 – труба; 17 – греющий источник; 18 – патрон; 19 – термодатчик; 20 – паз; 21 и 23 – ограничители оси; 22 – уплотнитель; 24 – греющий источник; 25 – схема автоматического регулирования температуры; R1-R6 – резисторы; C1 – конденсатор; VT1-VT3 – транзисторы; VS1 – тиристор; VD1-VD8 – диоды

**Fig. 6.** Scheme of automatic control of temperature in the sensor: 1 is the body; 2 is the cap; 3 and 4 are the flanges; 5 is the working element (gallium); 6 and 9 are the tubular axels of the heating source; 7 are the sealing cups; 8 are the end-to-end coaxial holes; 10 is the stand with a platform; 11 is the hole; 12 is the controlled cable; 13 is the casing pipe; 14 is the movable stand; 15 is the eye; 16 is the pipe; 17 is the heater; 18 is the cartridge; 19 is the temperature sensor; 20 is the groove; 21, 23 are the axis limiters; 22 is the gasket; 24 is the heating source; 25 is the scheme of temperature automatic control; R1-R6 are the resistors; C1 is the capacitor; VT1-VT3 are the transistors; VS1 is the thyristor; VD1-VD8 are the diodes

при сборке датчика. Колпак 4 находится внизу, а корпус 1 сверху датчика. Контролируемый провод 12 протягивают через внутреннюю полость трубчатых осей 6 и 9, уплотнительные манжеты 8 и сквозные соосные отверстия 7, просверленные в корпусе 1.

После этого подвижную стойку 14 перемещают по направляющим в пазу 20 стойки с платформой 10 и трубчатые оси 6 и 9 в продольном направлении (вправо), после чего поворачивают датчик с колпаком на  $180^\circ$  вокруг осей 6 и 9. Фланцы-ограничители 21 и 23 расположены за отверстиями 11 и 15 стоек на расстоянии, достаточном для того, чтобы трубу кожуха 13 можно было насадить на трубу 16. Подвижную стойку 14, оси 6 и 9 и жестко связанные с ними корпус 1 и колпак 2 перемещают (вправо) и оси 6 и 9 поворачивают на  $180^\circ$ . Эти продольные и вращательные перемещения происходят до тех пор, пока труба 16 не войдет в трубчатый кожух 13 и датчик примет положение, изображенное на рис. 5, В. В этом положении колпак 2 находится сверху, а корпус 1 – внизу. Галлий 5 в твердом состоянии также находится сверху над корпусом 1 внутри колпака 2. Поскольку галлий находится в твердом состоянии, внутренний размер фланца 4 колпака 2 меньше, чем внутренний диаметр фланца 3 корпуса, то галлий 5, упираясь в обрванный буртик, не проваливается вниз.

После установления датчика в положение, изображенное на рис. 5, В, на вход схемы регулирования мощности греющего источника 25 (рис. 6) подают переменное напряжение 220 В.

Греющий источник 17 с регулируемой мощностью включается на полную мощность, предусмотренную схемой 25. Тепловая энергия от теплового источника 17 начинает прогревать пространство вокруг себя, которое включает: трубу 16, трубу кожуха 16. При температуре  $29,8^\circ\text{C}$  галлий начнет плавиться и стекать в полость колпака датчика 2. Поскольку объем  $V_1$  галлия (внутренней полости колпака датчика 2) больше объема  $V_2$  полости корпуса 1, то расплавленный галлий полностью заполнит объем полости корпуса 1 и контролируемый провод 12 покроется слоем жидкого галлия 5. После этого можно приступать к контролю. По завершении контроля датчик вновь переводится в положение, изображенное на рис. 2, А. При этом из корпуса 1 стекает в колпак датчика 2. При отключении греющего источника 17, галлий 5 застывает в колпаке 2. Датчик подготовлен к следующему этапу контроля.

Схема регулирования мощности греющего источника 25 (рис. 6) предназначена для поддержания стабильной температуры внутри датчика [21], несколько превышающей температуру плавления галлия. Разогрев галлия происходит непрерывно, при строго определенной температуре, следующим образом. Силовой элемент (тиристор VS1) управляется фазоимпульсным методом. В момент включения нагревательный элемент 3 работает на полную мощность. По мере повышения температуры в

формообразующей обойме 1 мощность нагревательного элемента 3 плавно уменьшается. В рабочем режиме, при достижении заданной температуры, величина которой должна несколько превышать температуру плавления галлия, устанавливается термодинамическое равновесие, при котором количество тепла, получаемого от нагревательного элемента 3, становится равным количеству тепла, рассеиваемому в окружающую среду.

Транзисторы VT1, VT2 схемы тиристорного регулятора, приведенного на рис. 6, образуют аналог однопереходного транзистора. Диод VD8, включенный в обратном направлении, исполняет роль термодатчика 5, который установлен под формообразующей обоймой 1. Когда температура меньше рабочей, сопротивление термодатчика велико, транзистор VT3 закрыт и не оказывает влияние на работу однопереходного транзистора, тиристор открывается в начале каждого полупериода напряжения сети, нагревательный элемент 3 включен на полную мощность. При повышении температуры в формообразующей обойме сопротивление термодатчика VD9 уменьшается, транзистор VT3 переходит в проводящее состояние и начинает шунтировать интегрирующий конденсатор C1. Время его зарядки увеличивается, аналог однопереходного транзистора (VT1, VT2) станет включаться позже. Время включенного состояния тиристора VS1 станет меньше, мощность нагревательного элемента уменьшится. При достижении рабочей температуры в формообразующей обойме транзистор VT3 будет почти полностью открыт, а время включенного состояния тиристора станет минимальным, как и мощность нагревательного элемента 4. Он будет отдавать внутрь датчика столько тепла, сколько датчик отдает в окружающую среду. Такое состояние теплового равновесия будет сохраняться сколько угодно долго. Если температура в датчике начнет понижаться, то сопротивление термодатчика VD9 увеличится, сопротивление транзистора VT3 коллектор-эмиттер, выполняющего в данном процессе роль терморезистора, станет больше, интегрирующий конденсатор станет заряжаться быстрее, аналог однопереходного транзистора и тиристор будут открываться раньше, нагревательный элемент 3 будет дольше подключен к сети, количество тепла станет больше. Так будет до тех пор, пока температура не повысится до рабочей. Если температура станет выше рабочей, сопротивление термодатчика станет еще меньше, транзистор VT3 откроется полностью и «закоротит» интегрирующий конденсатор C1, тиристор VS1 выключится, нагревательный элемент отключится от сети. При понижении температуры процесс пойдет в обратном направлении. Переменный резистор R6 задает значение рабочей температуры внутри датчика. Стабилитрон VD8 стабилизирует работу аналога однопереходного транзистора. Если его исключить, точность поддержания температуры в датчике станет равной  $\pm 1,5^\circ\text{C}$ , что, конечно, не желательно. Диод VD5 защищает транзисторы VT1, VT2 от пробоя.

Последовательно включенные стабилитроны VD6, VD7 можно заменить одним стабилитроном, у которого напряжение стабилизации равно сумме напряжений стабилизации VD6 и VD7. Резистор R3 определяет напряжение открывания аналога однопереходного транзистора. На начальном этапе настройки вместо него включают переменный резистор с сопротивлением 20 кОм. После чего добиваются устойчивой работы терморегулятора в рабочем режиме. Отключают терморегулятор, измеряют сопротивление переменного резистора, и вместо него подключают постоянный резистор такого значения. Эта операция наиболее ответственна, и её, возможно, придется повторить несколько раз, чтобы наиболее точно подобрать R3. Может быть, также понадобится уточнить значение резистора R2. Транзистор VT3 должен иметь коэффициент усиления по току  $\beta=60-100$ . Большие значения коэффициента усиления делают терморегулятор слишком чувствительным, и даже незначительные флуктуации теплового потока в датчике изменяют режим его работы: он становится «колебательным». Меньшие значения коэффициента снижают точность поддержания температуры.

Для проверки работоспособности нами был изготовлен и опробован датчик для непрерывного контроля изоляции проводов по схеме, представленной на рис. 1. Корпус датчика и его колпак 2, труба кожуха 13 и труба 16 были выполнены из меди, так как она обладает достаточно высокой теплопроводностью. Объем внутренней полости колпака датчика  $2 V_1 - 24\ 000\ \text{мм}^3$ . Объем полости корпуса  $V_2 - 1800\ \text{мм}^3$ .

Оси 6 и 9 были выполнены из стальных трубок с внутренним диаметром 5 мм, а внешним – 10 мм. В стенках корпуса 1 на высоте 10 мм от внутренней поверхности дна стакана были просверлены сквозные соосные отверстия диаметром 0,5 мм, через которые протягивался контролируемый провод. Для предотвращения вытекания расплавленного галлия из проточки вокруг отверстий были выполнены расточки, внутрь которых были вставлены уплотняющие манжеты 7, выполненные из фторопласта. Внутренний диаметр манжет соответствовал диаметру контролируемого провода – 0,5 мм. Через уплотнительные манжеты 7 протягивался контролируемый провод марки ПЭТВ. Диаметр контролируемого провода – 0,5 мм. В качестве греющего источника 17 с регулируемой мощностью использовалась лампа накаливания марки РН 220–230–15–4 мощностью 15 Вт, диаметром 22 мм. В качестве термодатчика 19 был использован диод VD9, включенный в обратном направлении. В схеме регулирования мощностью греющего источника 21 были использованы постоянные резисторы R2, R3, R5 типов МЛТ, ВС-0,25, R1-МЛТ-2, R6-СП4–2М, СПО-1, конденсаторы С1-МБМ, К71–5 на напряжение не менее 160 В и транзисторы VT1 – КТ-316 Б, VT2 – КТ-315 Б. Используемые диоды VD1–VD4 имели марку КД202М, а диод VD5 – марку Д226Б. В ка-

честве термодатчика VD6 использованы *p-n*-переходы германиевого транзистора Д808А. Тиристор VS1 имел марку КУ201Л. Стабилитроны VD6, VD7, VD8 – марку Д808А. Реле К1 – импортное TSG1, с одной парой замыкающих и одной парой размыкающих контактов. Катушка реле К1 была рассчитана на напряжение 220 В. Общая максимальная мощность нагревательного элемента (не должна превышать 100 Вт при использовании тиристоров серии КУ201) – 25 Вт. К корпусу тиристора была прикручена медная пластина площадью не менее  $9\ \text{см}^2$ , которая выполняла роль теплового радиатора. Данная схема рассчитана на температуру  $39,2\ ^\circ\text{C}$ . Схема регулирования мощностью 6 греющего источника 3 обеспечивала не дискретный, а непрерывный (или «аналоговый») режим работы. Точность поддержания температуры внутри датчика составляла  $\pm 0,3\ ^\circ\text{C}$ .

Для сравнения галлиевого датчика с датчиком, выполненным из проводящей резины, были проведены следующие испытания. В эмалево-изолиated провод марки ПЭТВ диаметром 0,5 мм наносились искусственные дефекты протяженностью 0,1, 0,2, 0,3 и 0,4 мм. Провод с указанными размерами дефектов протягивался сначала через датчик-прототип, а потом через предлагаемый датчик. С помощью рассматриваемого датчика были надежно зарегистрированы все дефекты. Датчиком-прототипом были зарегистрированы только дефекты, протяженность которых превышала 0,3 мм. Датчик на основе проводящей резины после 200–250 контрольных проверок провода 50-метровой длины выходил из строя за счет истирания рабочего элемента. С помощью галлиевого датчика было проведено более 1000 подобных испытаний, но надежность и точность контроля изоляции проводов с его помощью оставались неизменными.

Таким образом, датчик на основе галлия имеет более высокую чувствительность (выше в 3 раза), чем датчик на основе проводящей резины, и почти на порядок более высокий срок службы и, соответственно, надежность.

#### Заключение

В статье рассмотрены особенности индукционного метода контроля дефектности изоляции проводов, позволяющего осуществлять контроль количества и протяженности дефектов без заземления жилы провода. Проведено обоснование причин систематической погрешности, возникающей в определении протяженности дефектов, и показан путь её устранения. Предложены критерии оценки качества изоляции проводов по двум параметрам: по количеству дефектов на единице длины провода и по их усредненной протяженности. Приведена практическая реализации способа и рассмотрен принцип работы измерителя дефектности, реализующего индукционный способ. Рассмотрены возможные варианты датчиков дефектов, приемлемые для реализации рассмотренного способа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курбатова О.А., Павлюченко В.М. Монтаж и ремонт горных машин и электрооборудования. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2004. – 286 с.
2. Ямансарин И.И. Исследование эксплуатационной надежности асинхронных двигателей в условиях горно-обогатительного комбината: автореф. дис.... канд. техн. наук. – Самара, 2012. – 20 с.
3. Gupta B. Risk in surge testing of turn insulation in windings of rotating machines // Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference. – Toronto, Canada, 2003. – P. 459–462.
4. Bellomo J.P., Castelan P., Lebey T. The effect of pulsed voltages on dielectric material properties // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 1999. – V. 6. – № 2. – P. 20–26.
5. Bohm F.R., Nagel K., Schindler H. A new generation of wire enamel for the production of magnet wires with outstanding corona resistance // Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference. – Toronto, Canada, 2003. – P. 109–113.
6. Bonnett A.H., Soukup G.C. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1992. – V. 28. – № 4. – P. 921–937.
7. Смирнов Г.В. Надежность изоляции обмоток электротехнических изделий. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 1990. – 192 с.
8. Применение магнитодиэлектрического композита на основе ультрадисперсного порошка никель-цинковых частиц для ресурсосберегающей технологии пропитки обмоток электрических машин / Г.В. Смирнов, О.Л. Хасанов, Д.Г. Смирнов, В.В. Полисадова, М.С. Петюкевич, З.Г. Бикбаева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 11. – С. 106–117.
9. PDIV characteristics of twisted-pair of magnet wires with repetitive impulse voltage / K. Kimura, S. Ushirone, T. Koyanagi, M. Nikita // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Ins. – Chicago, June 2007. – V. 14. – № 3. – P. 744–750.
10. Chapman M., Frost N., Bruetsch R. Insulation systems for rotating low-voltage machines // IEEE International Symposium on Electrical Insulation. – Toronto, Canada, 2008. – P. 257–260.
11. Похолков Ю.П., Бесперстов П.П., Пыхтин В.В. Исследование влияния технологического процесса изготовления обмоток на дефектность витковой изоляции асинхронных двигателей // Известия Томского политехнического института. – 1975. – Т. 222. – С. 52–65.
12. Leonov A.P., Redko V.V., Soldatenko E.Yu. Estimation of winding insulation resistance to the corona discharges // OP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Toronto, Canada, 2014. – V. 66. – P. 1–5.
13. Effect of surge voltage rise time on the insulation of low voltage machines fed by PWM converters / M. Melfi, A.M.J. Sung, S. Bell, G.L. Skibinski // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1997. – V. 1. – P. 239–246.
14. Schemmel F., Bauer K., Kaufhold M. Reliability and statistical lifetime-prognosis of motor winding insulation in low-voltage power drive systems // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2009. – V. 25. – № 4. – P. 6–13.
15. Stone G.C., Culbert I.M., Lloyd B.A. Stator insulation problems associated with low voltage and medium voltage PWM drives // IEEE Cement Industry Technical Conference Record. – Toronto, Canada, 2007. – P. 187–192.
16. Смирнов Г.В., Смирнов Д.Г. Физические основы неразрушающего контроля изоляции обмоток электроприводов горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 2. – С. 102–116.
17. ГОСТ ИЕС 60851-5-2011. Провода обмоточные. Методы испытаний. Ч. 5. Электрические свойства. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
18. Датчик для непрерывного контроля электрической прочности изоляции проводов: авт. свид. СССР № 1449949; заявл. 13.02.87; опубл. 07.01.87, Бюл. № 1. – 2 с.
19. Способ контроля эмалевой изоляции проводов: пат. Рос. Федерация № 2511229; заявл. 18.06.2012; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 10. – 18 с.
20. Датчик для непрерывного контроля изоляции проводов: пат. Рос. Федерация № 2505830; заявл. 18.06.2012; опубл. 27.01.2014, Бюл. № 3. – 11 с.
21. Оптимизация тепловых режимов в конструкциях световых приборов на полупроводниковых источниках света / А.А. Астахов, Д.Д. Каримбаев, А.О. Мисюнас, В.Г. Христюков // Доклады ТУСУРа. – 2011. – Ч. 2 – № 2 (24). – С. 81–89.

Поступила 13.10.2016 г.

## Информация об авторах

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

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

UDC 658.382.3

## BASIS FOR NONDESTRUCTIVE INDUCTION CONTROL OF WINDING INSULATION OF ELECTRICAL MACHINES

Gennadiy V. Smirnov<sup>1</sup>,  
smirnov@main.tusur.ru

Dmitriy G. Smirnov<sup>1</sup>,  
smirnov@main.tusur.ru

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

**The relevance** of the work is caused by the fact that electric machines are used in most production processes of various industries. The failure of the electrical machine leads to a crash, shutdown and consequently to high economic cost to elimination of the results of machine failure. The results of electric machines failure is especially tangible in exploration, production and transportation of geo-resources in oil, mining, coal, chemical and other industries, as these industries are the basis of budget formation now. The reliability and safety of these machines depend on condition of winding insulation, i.e. the enamel insulation of winding wires. Thus improving control of the enamel insulation of winding wires, their quality is the critical issue.

**The aim** of the research is to study the possibility of using electromagnetic induction for non-destructive testing of enamel insulation of winding wires.

**Research methods:** electromagnetic, for generating and studying the characteristics of a signal of contact defects transducer; micrometer, to determine the geometrical sizes of defects in enamel insulation and to match them with the control results.

**Results.** The authors have studied the possibility of using contact sensors of defects for controlling insulation of winding wires when using the induced EMF as a signal in the controlled wire conductor. The authors developed the method of controlling the defects in enamel insulation of wires to determine the number and length of defective areas of wire moving with any variable speed in it. The scheme of defects meter was proposed and the principle of its work was considered. The authors identified the systematic error when controlling the defects length caused by the finite size of the defect sensor. The paper introduces the method of its elimination.

### Key words:

Enamel insulation, defect, defect sensor, induction, leads generator, potential, pulse of defect, length, frequency, speed sensor.

### REFERENCES

- Kurbatov O.A., Pavlyuchenko V.M. *Montazh i remont gornykh mashin i elektrooborudovaniya* [Installation and repair of mining machines and equipment]. Vladivostok, FESTU Publ. house, 2004. 286 p.
- Yamansarin I. *Issledovanie ekspluatatsionnoy nadezhnosti asinkhronnykh dvigateley v usloviyakh gorno-obogotitel'nogo kombinata. Autoref. Dis. Kand. nauk* [Study of the operational reliability of asynchronous engines at mining and processing plant. Cand. Diss. Abstract]. Samara, 2012. 20 p.
- Gupta B. Risk in surge testing of turn insulation in windings of rotating machines. *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference*. Toronto, Canada, 2003. pp. 459–462.
- Bellomo J.P., Castelan P., Lebey T. The effect of pulsed voltages on dielectric material properties. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1999, vol. 6, no. 2, pp. 20–26.
- Bohm F.R., Nagel K., Schindler H. A new generation of wire enamel for the production of magnet wires with outstanding corona resistance. *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference*. Toronto, Canada, 2003. pp. 109–113.
- Bonnett A.H., Soukup G.C. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1992, vol. 28, no. 4, pp. 921–937.
- Smirnov G.V. *Nadezhnost izolyatsii elektrotekhnicheskikh izdeliy* [Reliability of insulation of electrical products]. Tomsk, Tomsk University Publ., 1990. 192 p.
- Smirnov G.V., Khasanov O.L., Smirnov D.G., Polisadov V.I., Petukovich M.S., Bikbaeva Z.G. Application of magneto-electric composite based on ultrafine powder of Nickel-zinc particles for resource-saving technology of impregnation of windings of electrical machines. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 11, pp. 106–117. In Rus.
- Kimura K., Ushirone S., Koyanagi T., Hikita M. PDIV characteristics of twisted-pair of magnet wires with repetitive impulse voltage. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Ins.* Chicago, June 2007. Vol. 14, no. 3, pp. 744–750.
- Chapman M., Frost N., Bruetsch R. Insulation systems for rotating low-voltage machines. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation* Toronto, Canada, 2008. pp. 257–260.
- Pokholkov Yu.P., Besperstov P.P., Pykhtin V.V. *Issledovanie vliyaniya tekhnologicheskogo protsessa izgotovleniya obmotok na defektnost vitkovoy izolyatsii asinkhronnykh dvigateley* [Study of the influence of technological process of manufacturing the windings on the deficiency of turn insulation of induction motors]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute*, 1975, vol. 222, pp. 52–65.
- Leonov A.P., Redko V.V., Soldatenko E.Yu. Estimation of winding insulation resistance to the corona discharges. *OP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66, pp. 1–5.
- Melfi M., Sung A.M.J., Bell S., Skibinski G.L. Effect of surge voltage risetime on the insulation of low voltage machines fed by PWM converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1997, vol. 1, pp. 239–246.
- Schemmel F., Bauer K., Kaufhold M. Reliability and statistical lifetime-prognosis of motor winding insulation in low-voltage power drive systems. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2009, vol. 25, no. 4, pp. 6–13.
- Stone G.C., Culbert I.M., Lloyd B.A. Stator insulation problems associated with low voltage and medium voltage PWM drives.

- IEEE Cement Industry Technical Conference Record*. Toronto, Canada, 2007. pp. 187–192.
16. Smirnov G.V., Smirnov D.G. Physical basis of non-destructive control of winding insulation of electric drives of mining and oil field equipment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 2, pp. 102–116. In Rus.
  17. *GOST IEC 60851–5-2011. Provoda obmotochnye. Metody ispytany. Ch. 5. Elektricheskie svoystva* [State standard IEC 60851–5-2011. Magnet wires. Test methods. P. 5. Electrical properties]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 19 p.
  18. Smirnov G.V., Kosentchuk N.A., Scherb S.Schi. *Datchik dlya nepreryvnogo kontrolya elektricheskoy prochnosti isolyatsii provodov* [Sensor for continuous monitoring of dielectric strength of wire insulation]. Invention certificate USSR no. 1449949, 1987.
  19. Smirnov G.V., Smirnov D.G. *Sposob kontrolya emaievoy isolyatsii provodov* [Method of controlling wire enamel insulation]. Patent RF, no. 2511229, 2014.
  20. Smirnov G.V., Smirnov D.G. *Datchik dlya nepreryvnogo kontrolya izolyatsii provodov* [Sensor for continuous monitoring of wires insulation]. Patent RF no. 2505830, 2014.
  21. Astakhov A.A., Karimbaev D.D., Misyunas A.O., Khristykov V.G. *Optimisatsiya teplovykh rezhimov v konstruktsiyakh svetovykh priborov na poluprovodnikovyykh istotchnikakh sveta* [Optimization of thermal regimes in construction of lighting devices on semiconductor light source]. Reports of TUSUR, 2011, P. 2, no. 2 (24), pp. 81–89.

Received: 13 October 2016.

#### Information about the authors

**Gennadiy V. Smirnov**, Dr. Sc., professor, director, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

**Dmitriy G. Smirnov**, Cand., Sc., senior researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

УДК 66.021

## МАССООБМЕННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УДАРНО-РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ НАСАДКИ

Андреев Матвей Викторович<sup>1</sup>,  
nir@angtu.ru

Бальчугов Алексей Валерьевич<sup>1</sup>,  
balchug@mail.ru

Дубровский Дмитрий Александрович<sup>2</sup>,  
dubrovskiyda@inbox.ru

Коробочкин Валерий Васильевич<sup>3</sup>,  
vkorobochkin@tpu.ru

<sup>1</sup> Ангарский государственный технический университет,  
Россия, 665835, г. Ангарск, ул. Чайковского, 60.

<sup>2</sup> ИЦ-УКК ОАО «Ангарская нефтехимическая компания»,  
Россия, 665830, г. Ангарск, а/я 65.

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью интенсификации массообменных процессов в газожидкостных системах для уменьшения габаритов промышленных аппаратов и снижения вредных выбросов в окружающую среду.

**Цель работы:** экспериментально определить объемные коэффициенты массопередачи при десорбции диоксида углерода из воды в поток воздуха на новой ударно-распылительной насадке при различных приведенных скоростях газа и плотностях орошения и на основе полученных данных выполнить сравнение эффективности ударно-распылительной насадки с известными насадками.

**Методы исследования:** экспериментальное определение объемных коэффициентов массопередачи с использованием уравнений материального баланса и массопередачи, прямое титрование, инструментальное определение расходов газа и жидкости.

**Результаты.** Получена база экспериментальных данных по объемным коэффициентам массопередачи при десорбции диоксида углерода из воды в широком диапазоне приведенных скоростей газа и плотностей орошения на новой регулярной ударно-распылительной насадке. Установлено, что зависимость объемного коэффициента массопередачи на ударно-распылительной насадке от плотности орошения имеет экстремальный характер. Возникновение максимумов объясняется свойствами гидродинамических режимов, при которых обеспечивается развитая поверхность контакта фаз и высокая интенсивность массопереноса. Показано, что в зависимости от плотности орошения и приведенной скорости газа на ударно-распылительной насадке возникают четыре гидродинамических режима: струйный; распылительный; ударно-распылительный и режим захлебывания. Показано, что при приведенной скорости газа 1,21–1,56 м/с объемный коэффициент массопередачи на ударно-распылительной насадке в 2,49–3,33 раза превышает объемный коэффициент массопередачи на насадке ГИАП НЗ (эквивалентный диаметр  $d_p = 0,038$  м). Это объясняется созданием в новой насадке высокоэффективного ударно-распылительного гидродинамического режима. Показано, что новая ударно-распылительная насадка является перспективной для проведения газожидкостных процессов в химических производствах.

### Ключевые слова:

Массоперенос, десорбция диоксида углерода из воды, ударно-распылительная насадка, интенсивность массопереноса, объемный коэффициент массопередачи.

### Введение

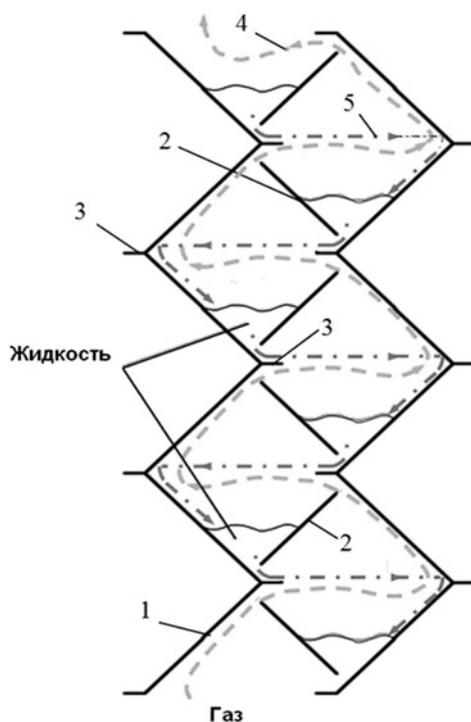
Насадочные аппараты нашли широкое применение для проведения массообменных процессов между газом и жидкостью в различных областях химической и нефтехимической технологии [1–3]. Тип насадочного контактного устройства определяет интенсивность массопереноса и эффективность работы аппарата в целом [4–6]. Совершенствованию известных конструкций насадок посвящен ряд работ, целью которых являлось повышение поверхности контакта фаз [7], увеличение массообменной эффективности насадок [8–10] и улучшение гидродинамических характеристик [11–13]. В большинстве работ массообменная эффективность насадки характеризуется объемным

коэффициентом массопередачи, показывающим, какое количество компонента перешло через границу раздела фаз в единицу времени в  $1 \text{ м}^3$  насадки, отнесенное к движущей силе процесса [14, 15]. В патенте [16] для проведения газожидкостных массообменных процессов предложена новая ударно-распылительная регулярная насадка с многоступенчатым контактом газа и жидкости. В отличие от известных насадок [4], использующих ударно-распылительный принцип контакта газа и жидкости, новая насадка компактна, характеризуется простотой конструкцией и развитой поверхностью контакта фаз, формируемой в объеме насадки. Представляется актуальным определить массообменную эффективность новой ударно-распыли-

тельной насадки. Сравнение интенсивности массопереноса на насадках различных типов часто выполняют на примере системы «диоксид углерода – вода», как адекватно воспроизводимой модели [17–19]. В настоящей работе поставлена цель экспериментально определить объемные коэффициенты массопередачи при десорбции диоксида углерода из воды в поток воздуха на новой ударно-распылительной насадке при различных приведенных скоростях газа и плотностях орошения и на основе полученных данных выполнить сравнение эффективности ударно-распылительной насадки с известными насадками.

### Результаты и их обсуждение

Схема ударно-распылительной насадки и схема потоков газа и жидкости в слое насадки представлены на рис. 1. Насадка состоит из вертикальных гофрированных листов двух видов (1 и 2), установленных попеременно. На вершинах гофр листа 1 имеются плоские горизонтальные площадки 3, а на вершинах гофр листа 2 – щели. Гофры листа 2 выполнены перфорированными с площадью свободного сечения 22 %. В собранном виде гофрированные листы образуют горизонтальные ромбовидные (квадратные) каналы (ступени) и вертикальные каналы зигзагообразной формы для прохождения газа и жидкости.



**Рис. 1.** Схема потоков газа и жидкости на ударно-распылительной насадке: 1, 2 – гофрированные листы; 3 – горизонтальная площадка; 4 – поток газа; 5 – поток жидкости

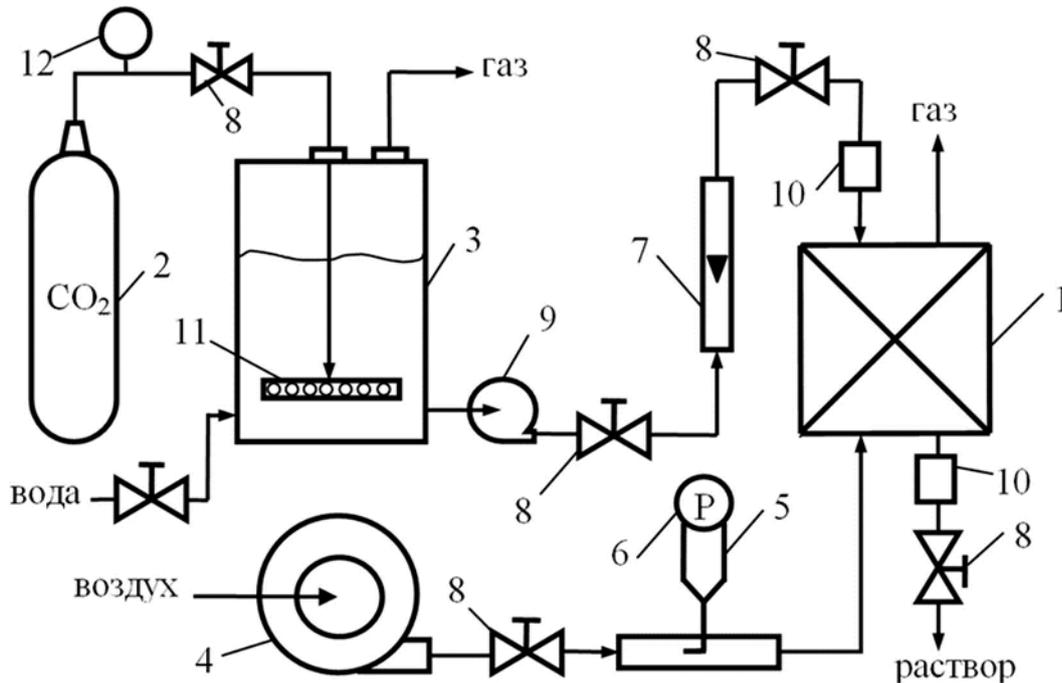
**Fig. 1.** Diagram of gas and liquid flows in the shock-spray packing; 1, 2 are the corrugated sheets; 3 is the horizontal platform; 4 is the gas flow; 5 is the fluid flow

Жидкость в насадке стекает сверху вниз, заполняя нижнюю часть ромбовидных (квадратных) каналов и исполняя роль гидрозатвора. Плоские струи жидкости, стекая с горизонтальных площадок 3, распыляются потоком газа. Газ, поднимаясь снизу вверх по зигзагообразным каналам, образованным листами 1 и 2, взаимодействует со струями жидкости. После истечения с горизонтальной площадки струи жидкости и газа сначала движутся прямооточно, а затем, после удара о противоположную стенку, интенсивно перемешиваются, происходит диспергирование фаз. Это обеспечивает увеличение интенсивности массопереноса и повышение эффективности работы ударно-распылительной насадки. Таким образом, в новой насадке контакт фаз происходит не на поверхности насадки, а в ее объеме, в результате интенсивного перемешивания струй газа и жидкости. В каждой ступени насадки осуществляется прямоток, а в аппарате в целом – противоток. Ударно-распылительная насадка (рис. 1) занимает промежуточное положение между тарельчатыми и насадочными контактными устройствами. С тарельчатыми устройствами ее сближает то, что в объеме насадки в нижней части ромбовидных (квадратных) каналов накапливается жидкость, которая играет роль гидрозатвора и одновременно принимает участие в массообмене. С насадочными устройствами новое контактное устройство объединяет то, что в нем осуществляется непрерывный контакт газа и жидкости и отсутствует межступенчатое пространство для отделения брызг от газа.

Схема лабораторной установки для экспериментальных исследований ударно-распылительной насадки представлена на рис. 2. Элемент насадки 1 выполнен из прозрачного органического стекла для визуализации процесса. В ходе экспериментов рабочими средами были воздух, диоксид углерода и вода. Давление в элементе насадки 1 ат, температура 17 °С.

С целью снижения затрат на проведение исследований на данной установке (рис. 2) выполнены массообменные исследования элемента насадки, состоящего из двух смежных ступеней контакта. Исследованный элемент насадки схематично изображен на рис. 3. Он выполнен из оргстекла для визуализации процесса. Общая высота элемента насадки – 0,185 м, его протяженность – 0,195 м, сторона квадрата имеет длину 0,055 м. Эквивалентный диаметр элемента насадки составил 0,055 м, свободный объем – 0,82.

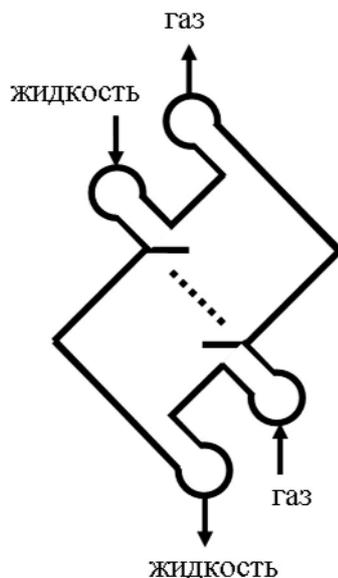
Проведена серия экспериментов, в ходе которой с заданным шагом изменялись расход воздуха и плотность орошения, определялась концентрация диоксида углерода в жидкости на входе и на выходе из насадки и затем рассчитывалось соответствующее значение объемного коэффициента массопередачи. В экспериментах расход воздуха менялся от 29 до 67 м<sup>3</sup>/ч, приведенная скорость газа составляла от 0,68 до 1,56 м/с, плотность орошения – от 29 до 184 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч. Значение расхода



**Рис. 2.** Схема лабораторной установки для исследования ударно-распылительной насадки: 1 – элемент насадки; 2 – баллон с  $\text{CO}_2$ ; 3 – ёмкость для насыщения воды  $\text{CO}_2$ ; 4 – воздуходувка; 5 – трубка Пито-Прандтля; 6 – микроманометр; 7 – ротаметр; 8 – вентиль; 9 – насос; 10 – пробоотборник жидкости; 11 – барботёр; 12 – манометр

**Fig. 2.** Scheme of laboratory setup for studying the shock-spray packing: 1 is the packing element; 2 is the tank with  $\text{CO}_2$ ; 3 is the capacity for  $\text{CO}_2$  water saturation; 4 is the blower; 5 is the Pitot-Prandtl tube; 6 is the micromanometer; 7 is the rotameter; 8 is the valve; 9 is the pump; 10 is the fluid sampler; 11 is the bubbler; 12 is the manometer

воздуха ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ) определялось на основании показаний микроманометра 6, установленного на трубке Пито-Прандтля 5.



**Рис. 3.** Схема элемента ударно-распылительной насадки из двух ступеней контакта

**Fig. 3.** Scheme of the element of the shock-spray packing with two contact stages

Методика проведения экспериментов по определению объемных коэффициентов массопередачи состояла в следующем. Из баллона 2 в ёмкость с водой 3 через барботёр 11 подается газообразный диоксид углерода. Регулирование расхода диоксида углерода осуществляется с помощью вентилей 8. Вода в ёмкости 3 насыщается диоксидом углерода. Далее насосом 9 вода с растворенным в ней диоксидом углерода подается в качестве орошения на элемент насадки 1. Расход жидкости измеряется с помощью ротаметра 7. Из пробоотборников 10 на входе и выходе из элемента насадки отбираются пробы для анализа. Концентрацию углекислого газа в воде определяли путем титрования раствором гидроксида натрия (0,1 н) в присутствии фенолфталеина до получения розовой окраски, соответствующей окраске стандартного раствора, рН которого равен 8,4, по стандартной методике.

Расчет концентрации диоксида углерода в жидкости ( $\text{мг}/\text{л}$ ) выполнялся по результатам титрования по формуле

$$C_{\text{ж}} = \frac{V_1 \cdot N \cdot Mr \cdot 500}{V_2},$$

где  $V_1$  – объем раствора щелочи, пошедшего на титрование, мл;  $N$  – нормальность раствора;  $Mr$  – молекулярная масса диоксида углерода, кг/кмоль;  $V_2$  – объем пробы, мл.

Концентрация диоксида углерода в потоке воздуха на выходе из элемента насадки определялась на основе материального баланса:

$$C_{г,кон} = \frac{L \cdot (C_{ж,нач} - C_{ж,кон})}{V} + C_{г,нач},$$

где  $C_{г,кон}$  – конечная концентрация диоксида углерода в газе, мг/л;  $C_{г,нач}$  – начальная концентрация диоксида углерода в газе, мг/л;  $L$  – объемный расход жидкости, м<sup>3</sup>/ч;  $V$  – объемный расход газа, м<sup>3</sup>/ч;  $C_{ж,кон}$  – конечная концентрация диоксида углерода в жидкости, мг/л;  $C_{ж,нач}$  – начальная концентрация диоксида углерода в жидкости, мг/л.

При давлении 1 ат и температуре 20 °С равновесная концентрация диоксида углерода в жидкости связана с концентрацией в газе соотношением

$$C_{ж}^* = \gamma C_{г},$$

где  $\gamma$  – коэффициент распределения.

Движущую силу в верхней и нижней части насадки определяли по уравнению

$$\Delta_{в(н)} = C_{ж} - C_{ж}^*,$$

где  $\Delta_{в(н)}$  – движущая сила соответственно в верхней и нижней части насадки.

Среднюю движущую силу процесса массопереноса определяли по формуле

$$\Delta = \frac{\Delta_{в} + \Delta_{н}}{2}.$$

Объемный коэффициент массоотдачи в жидкости (ч<sup>-1</sup>) определяли по уравнению

$$K_v = \frac{M}{\Delta \cdot V_n},$$

где  $M$  – количество компонента, перенесенного через границу раздела фаз, кмоль/ч;  $\Delta$  – движущая сила процесса, кмоль/м<sup>3</sup>;  $V_n$  – объем насадки, м<sup>3</sup>.

В результате экспериментов получена база данных по объемным коэффициентам массопереноса при различной приведенной скорости газа и плотности орошения.

На рис. 4 приведена зависимость объемного коэффициента массопереноса от плотности орошения при различных приведенных скоростях газа. На кривых рис. 4 наблюдаются два экстремума. Экстремальная зависимость объемного коэффициента массопереноса от плотности орошения объясняется сменой гидродинамических режимов, которые мы имели возможность наблюдать через стеклянные стенки насадки. Первый максимум возникает при плотности орошения приблизительно 50–70 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч. Возникновение данного максимума объясняется характером гидродинамического режима, при котором струя жидкости в ячейке распыляется потоком газа с образованием мелких капель, что приводит к увеличению поверхности контакта фаз и интенсивности массопереноса. Вторым максимумом возникает при плотности орошения более 110 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч. Он объясняется возникновением ударно-струйного гидродинамического режима, при котором струя жидкости распыляется пото-

ком газа и ударяется о стенку насадки, обеспечивая эффективное перемешивание фаз. Снижение интенсивности массопереноса при дальнейшем увеличении плотности орошения объясняется возникновением режима захлебывания. Таким образом, в ходе экспериментов на ударно-распылительной насадке наблюдались четыре гидродинамических режима: струйный режим (при плотностях орошения 29–50 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч); распылительный режим (50–70 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч); ударно-распылительный режим (70–165 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч при приведенной скорости газа 1,4–1,56 м/с); режим захлебывания (плотность орошения более 165 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч при приведенной скорости газа 1,4–1,56 м/с).

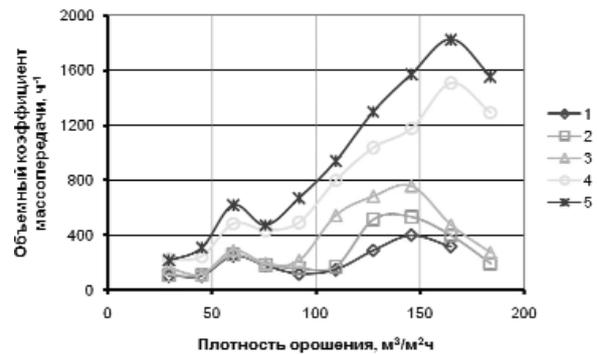


Рис. 4. Зависимость объемного коэффициента массопереноса от плотности орошения. Приведенная скорость газа: 1 – 0,68; 2 – 0,98; 3 – 1,21; 4 – 1,40; 5 – 1,56 м/с

Fig. 4. Dependence of the mass transfer volumetric coefficient on irrigation density. The superficial gas velocity is: 1) 0,68; 2) 0,98; 3) 1,21; 4) 1,40; 5) 1,56 m/s

На рис. 5 приведена зависимость объемного коэффициента массопереноса от приведенной скорости газа при различных плотностях орошения.

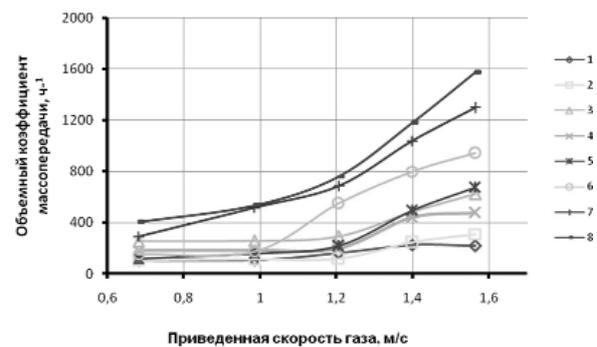


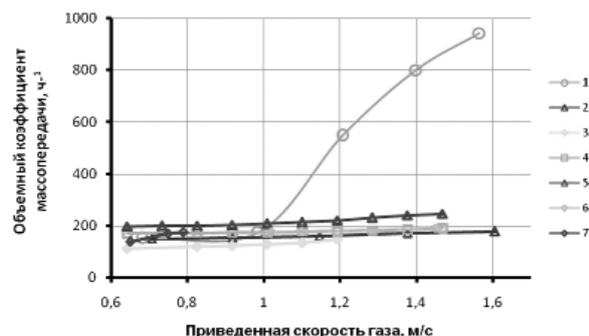
Рис. 5. Зависимость объемного коэффициента массопереноса от приведенной скорости газа. Плотность орошения: 1 – 29,12; 2 – 44,98; 3 – 60,14; 4 – 75,68; 5 – 91,84; 6 – 109,54; 7 – 127,56; 8 – 145,89 м³/м²·ч

Fig. 5. Dependence of the mass transfer volumetric coefficient on the superficial gas velocity. The irrigation density is: 1) 29,12; 2) 44,98; 3) 60,14; 4) 75,68; 5) 91,84; 6) 109,54; 7) 127,56; 8) 145,89 m³/m²·h

Как видно из рис. 5, объемный коэффициент массопереноса возрастает при увеличении приведенной скорости газа при всех плотностях орошения. Это объясняется тем, что при увеличении приведенной скорости газа возрастает турбулент-

ность газового потока и, как следствие, возрастает поверхность контакта фаз и коэффициенты массоотдачи в жидкости. Это приводит к увеличению интенсивности массопереноса диоксида углерода из жидкой фазы в газовую.

На рис. 6 представлено сравнение интенсивности массопереноса на новой ударно-распылительной насадке с интенсивностью массопереноса на других известных насадках, применяющихся в настоящее время для проведения процесса десорбции диоксида углерода из воды.



**Рис. 6.** Зависимость объемного коэффициента массопередачи от приведенной скорости газа на различных насадках: 1 – ударно-распылительная насадка, плотность орошения  $109,54 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ ; 2 – кольца Палля,  $d_s=0,04 \text{ м}$ , плотность орошения  $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$  [18]; 3 – насадка Инталокс,  $d_s=0,05 \text{ м}$ , плотность орошения  $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$  [18]; 4 – насадка ГИАП-НЗ,  $d_s=0,05 \text{ м}$ , плотность орошения  $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$  [18]; 5 – насадка ГИАП-НЗ,  $d_s=0,038 \text{ м}$ , плотность орошения  $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$  [18]; 6 – цепная насадка,  $d_s=0,007 \text{ м}$ , плотность орошения  $111 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$  [1]; 7 – кольца Рашига,  $d_s=0,007 \text{ м}$ , плотность орошения  $111 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$  [1]

**Fig. 6.** Dependence of the volumetric coefficient of mass transfer on superficial gas velocity at various packings: 1 is the shock-spray packing, irrigation density is  $109,54 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ ; 2 is the Pall rings,  $d_s=0,04 \text{ м}$ , the irrigation density is  $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$  [18]; 3 is the Intaloks packing,  $d_s=0,05 \text{ м}$ , the irrigation density is  $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$  [18]; 4 is the GIAP H3 packing,  $d_s=0,05 \text{ м}$ , the irrigation density is  $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$  [18]; 5 is the GIAP H3 packing,  $d_s=0,038 \text{ м}$ , the irrigation density is  $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$  [18]; 6 is the chain packing,  $d_s=0,007 \text{ м}$ , the irrigation density is  $111 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$  [1]; 7 is the Raschig rings,  $d_s=0,007 \text{ м}$ , the irrigation density is  $111 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$  [1]

Анализ рис. 6 показывает, что при приведенной скорости газа  $1,21\text{--}1,56 \text{ м/с}$  объемный коэффициент массопередачи в  $2,49\text{--}3,33$  раза превышает объемный коэффициент массопередачи на насадке ГИАП-НЗ,  $d=0,038 \text{ м}$ . Это объясняется созданием высокоэффективного ударно-распылительного гидродинамического режима в новой насадке при данных скоростях газа и плотностях орошения. При ударно-распылительном режиме формируется развитая поверхность контакта фаз и интенсивное перемешивание, что обеспечивает существенное увеличение интенсивности массопереноса.

Ранее было установлено, что ударно-распылительная насадка обладает достаточно хорошими гидравлическими характеристиками [20]. Результаты работы [20], а также данные, представленные

на рис. 6, показывают, что новая ударно-распылительная насадка является перспективной для разделения систем газ–жидкость в различных производствах.

### Выводы

1. Новая ударно-распылительная насадка характеризуется простотой конструкции, компактностью и высокой интенсивностью массопереноса в газожидкостных системах. Экспериментально доказано, что объемный коэффициент массопередачи при десорбции диоксида углерода из воды на новой насадке в  $2,49\text{--}3,33$  раза превышает объемный коэффициент массопередачи на насадке ГИАП-НЗ, которая до настоящего времени обеспечивала самую высокую интенсивность десорбции диоксида углерода. Высокая интенсивность массопереноса на новой насадке объясняется формированием высокоэффективного ударно-распылительного гидродинамического режима с развитой поверхностью контакта фаз. Это позволяет рекомендовать ударно-распылительную насадку для проведения газожидкостных массообменных процессов, таких как абсорбция, десорбция, ректификация и др.
2. Показано, что в зависимости от плотности орошения и приведенной скорости газа на ударно-распылительной насадке возникают четыре гидродинамических режима: струйный режим (при плотностях орошения  $29\text{--}50 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ ); распылительный режим ( $50\text{--}70 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ ); ударно-распылительный режим ( $70\text{--}165 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$  при приведенной скорости газа  $1,4\text{--}1,56 \text{ м/с}$ ); режим захлебывания (плотность орошения более  $165 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$  при приведенной скорости газа  $1,4\text{--}1,56 \text{ м/с}$ ).
3. Установлено, что зависимость объемного коэффициента массопередачи на ударно-распылительной насадке от плотности орошения имеет экстремальный характер. Возникновение максимумов объясняется свойствами возникающих гидродинамических режимов, при которых обеспечивается развитая поверхность контакта фаз и высокая интенсивность массопереноса.
4. Объемный коэффициент массопередачи возрастает при увеличении приведенной скорости газа при всех плотностях орошения и достигает  $1572,9 \text{ ч}^{-1}$  при скорости газа  $1,56 \text{ м/с}$  и плотности орошения  $145,89 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ . Высокое значение объемного коэффициента массопередачи объясняется тем, что при увеличении приведенной скорости газа возрастает турбулентность газового потока и, как следствие, возрастает поверхность контакта фаз и коэффициенты массоотдачи в жидкости.
5. Экспериментально определенные коэффициенты массопередачи могут быть использованы при проектировании промышленных десорбционных аппаратов с новой ударно-распылительной насадкой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыжов С.О. Интенсификация десорбции диоксида углерода из водных растворов на высокоэффективной регулярной насадке: автореф. ... дис. канд. тех. наук. – Томск, 2013. – 21 с.
2. On the modeling of gas-phase mass-transfer in metal sheet structured packings / F.J. Rejl, L. Valenz, J. Haidl, M. Kordač, T. Moucha // Chemical Engineering Research and Design. – 2015. – № 93. – P. 194–202.
3. Моделирование процесса абсорбции аммиака и метиламинов водой на новой регулярной насадке / М.В. Андреев, И.В. Скачков, А.В. Бальчугов, В.В. Коробочкин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 6. – С. 69–78.
4. Рамм В.М. Абсорбция газов. – М.: РГБ, 2009. – 655 с.
5. Plate Efficiency in Rectification of Binary Mixtures in the Presence of an Inert Gas / I.A. Semenov, B.A. Ulyanov, D.N. Sitnikov, M.Yu. Fereferov // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2011. – V. 84. – № 12. – P. 2071–2075.
6. Semenov I.A., Ulyanov B.A., Kulov N.N. Effect of Ultrasound on the Dissolution of Carbon Dioxide in Water // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2011. – V. 45. – № 1. – P. 21–25.
7. Каган А.М., Юдина Л.А., Пушнов А.С. О повышении предельно допустимых нагрузок при работе массообменных аппаратов с насадочными устройствами // Химическая промышленность. – 2001. – № 4. – С. 46–48.
8. Hydraulic and mass-transfer characteristics of Raschig Super-Pak 250Y / F.J. Rejl, L. Valenz, J. Haidl, M. Kordač, T. Moucha // Chemical Engineering Research and Design. – 2015. – № 99. – P. 20–27.
9. Скачков И.В., Бальчугов А.В., Рыжов С.О. Гидродинамические исследования технологии газожидкостных процессов на новой регулярной насадке // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – № 3 (35). – С. 147–150.
10. Simulation of a Distillation Column with Nonequimolar Mass Transfer in the Production of Methylamines / I.A. Semenov, B.A. Ulyanov, D.A. Dubrovskii, N.N. Kulov // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2014. – V. 48. – № 5. – P. 644–649.
11. Исследование гидродинамики регулярных насадок из сетчатых наклонных цилиндров для осуществления тепло- и массообменных процессов / М.В. Шилин, М.Г. Беренгартен, А.С. Пушнов, М.И. Ключенкова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2012. – № 10. – С. 10–13.
12. Diego D.D. Pinto, Rob Emonds, Geert F. Versteeg. Experimental Determination of Mass-transfer Coefficients and Area of Dumped Packing Using Alkanolamine Solvents // Energy Procedia. – 2016. – № 86. – P. 219–228.
13. Расчет гидродинамических параметров регулярных структурированных насадок / Г.Б. Дмитриева, М.Г. Беренгартен, М.И. Ключенкова, А.С. Пушнов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2005. – № 12. – С. 5–9.
14. Rzehak R., Krepper E. Euler-Euler simulation of mass-transfer in bubbly flows // Chemical Engineering Science. – 2016. – V. 155. – № 22. – P. 459–468.
15. Semenov I.A., Pokrovskaya M.A. Estimating the parameters of  $\gamma$ -models for binary mixtures from surface tension data // Theoretical foundations of chemical engineering. – 2014. – № 1. – P. 90–95.
16. Бальчугов А.В., Васильев А.В., Кузюра И.Е. Регулярная насадка для тепло- и массообменных аппаратов: пат. Российская Федерация № 2452560; заявл. 28.02.2011; опубл. 10.06.2012, Бюл. № 16. – 3 с.
17. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – М.: Альянс, 2007. – 576 с.
18. Каган А.М., Юдина Л.А., Пушнов А.С. Нерегулярная металлическая насадка ГИАП-НЗ и некоторые аспекты ее промышленного использования // Химическая промышленность. – 2001. – № 5. – С. 43–46.
19. Коэффициенты массоотдачи в жидкости при растворении пузырьков углекислоты в условиях акустических воздействий / Е.В. Подоплелов, И.А. Семёнов, В.В. Бизимов, А.И. Лушев // Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2009. – № 1. – С. 27.
20. Гидравлические испытания двух модификаций элемента регулярной насадки / М.В. Андреев, Д.Н. Игнатьев, Т.Н. Мусева, А.В. Бальчугов // Химия и химическая технология: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Ангарск, 2016. – С. 3–6.

Поступила 30.09.2016 г.

## Информация об авторах

**Андреев М.В.**, аспирант кафедры машин и аппаратов химических производств Ангарского государственного технического университета.

**Бальчугов А.В.**, доктор технических наук, проректор по научной работе Ангарского государственного технического университета.

**Дубровский Д.А.**, кандидат технических наук, начальник центральной лаборатории ИЦ-УКК ОАО «Ангарская нефтехимическая компания».

**Коробочкин В.В.**, доктор технических наук, профессор кафедры общей химии и химической технологии Института физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 66.021

## MASS TRANSFER EFFICIENCY OF SHOCK-SPRAY PACKING

**Matvey V. Andreenko**<sup>1</sup>,  
nir@angtu.ru

**Alexey V. Balchugov**<sup>1</sup>,  
balchug@mail.ru

**Dmitriy A. Dubrovsky**<sup>2</sup>,  
dubrovskiyda@inbox.ru

**Valeriy V. Korobochkin**<sup>3</sup>,  
vkorobochkin@tpu.ru

<sup>1</sup> Angarsk State Technical University,  
60, Tchaikovsky street, Angarsk, 665835, Russia.

<sup>2</sup> Joint-stock company «Angarsk petrochemical company»,  
Angarsk, 665830, Russia, PO box 65.

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

*Relevance of the work is caused by the need to intensify mass transfer in gas-liquid systems for reducing the dimensions of industrial apparatus and decreasing harmful emissions into the environment.*

**The main aim** of the study is to determine experimentally the volumetric coefficient of mass transfer in carbon dioxide desorption from water into the air stream on a new shock-spray packing at different relative gas velocity and irrigation density and to compare the efficiency of the shock-spray packing with the known ones based on the experimental data obtained.

**The methods used in the study:** experimental determination of the volumetric coefficients of mass transfer using the material balance and mass transfer equations, direct titration, instrumental definition of gas and liquid flow rates.

**The results.** The authors have obtained the experimental data base on the volumetric coefficients of mass transfer at carbon dioxide desorption from water in a wide range of superficial gas velocities and irrigation densities in the new regular shock-spray packing. It was found out that the dependence of the volumetric mass transfer coefficient in the shock-spray packing on irrigation density is extreme. The appearance of maxima is explained by the properties of arising hydrodynamic regimes, which provide the developed surface of phase contact and high intensity of mass transfer. It is shown that, depending on the irrigation density and superficial gas velocity on the shock-spray packing, four hydrodynamic regimes: jet, spray, shock-spray and flooding, occur. It was shown that when the gas superficial velocity is 1,21–1,56 m/s the volumetric mass transfer coefficient in the shock-spray packing exceeds in 2,49–3,33 times the volumetric mass transfer coefficient on the packing GIAP H3 (equivalent diameter  $d_e=0,038$  m). This fact is explained by hydrodynamic regime in the new packing shock-spray. It is shown that the new shock-spray packing is prospective for gas-liquid processes in chemical industry.

### Key words:

Mass transfer, carbon dioxide desorption from water, shock-spray packing, mass transfer intensity, volumetric coefficient of mass transfer.

### REFERENCES

- Ryzhov S.O. *Intensifikatsiya desorptsii dioksida ugleroda iz vodnykh rastvorov na vysokoeffektivnoy regulyarnoy nasadke*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk. [Intensification of carbon dioxide stripping from aqueous solutions for highly regular packing. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2013. 21 p.
- Rejl F.J., Valenz L., Haidl J., Kordač M., Moucha T. On the modeling of gas-phase mass-transfer in metal sheet structured packings. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, no. 93, pp. 194–202.
- Andreenko M.V., Skachkov I.V., Balchugov A.V., Korobochkin V.V. Modeling of ammonia and methylamines absorption with water on a new regular packing. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 6, pp. 69–78. In Rus.
- Ramm V.M. *Absorbciya gazov* [Absorption of gases]. Moscow, RGB Publ., 2009. 655 p.
- Semenov I.A., Ulyanov B.A., Sitnikov D.N., Fereferov M.Yu. Plate Efficiency in Rectification of Binary Mixtures in the Presence of an Inert Gas. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2011, vol. 84, no. 12, pp. 2071–2075.
- Semenov I.A., Ulyanov B.A., Kulov N.N. Effect of Ultrasound on the Dissolution of Carbon Dioxide in Water. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2011, vol. 45, no. 1, pp. 21–25.
- Kagan A.M., Yudina L.A., Pushnov A.S. O povyshenii predelno dopustimyykh nagruzok pri rabote massoobmennyykh apparatov s nasadochnymi ustroystvami [On increasing the maximum permissible load at operation of mass transfer devices with packed devices]. *Khimicheskaya promyshlennost*, 2001, no. 4, pp. 46–48.
- Rejl F.J., Valenz L., Haidl J., Kordač M., Moucha T. Hydraulic and mass-transfer characteristics of Raschig Super-Pak 250Y. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, no. 99, pp. 20–27.
- Skachkov I.V., Balchugov A.V., Ryzhov S.O. Hydrodynamic studies of gas-liquid technology in a new regular packing. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie*, 2012, no. 3 (35), pp. 147–150. In Rus.
- Semenov I.A., Ulyanov B.A., Dubrovskii D.A., Kulov N.N. Simulation of a Distillation Column with Nonequimolar Mass Transfer in the Production of Methylamines. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2014, vol. 48, no. 5, pp. 644–649.

11. Shilin M.V., Berengarten M.G., Pushnov A.S., Klyushenkova M.I. Study of hydrodynamics of regular the packing of inclined mesh cylinders for heat and mass transfer. *Chemical and petroleum engineering*, 2012, no. 10, pp. 10–13. In Rus.
12. Diego D.D. Pinto, Rob Emonds, Geert F. Versteeg. Experimental Determination of Mass-transfer Coefficients and Area of Dumped Packing Using Alkanolamine Solvents. *Energy Procedia*, 2016, no. 86, pp. 219–228.
13. Dmitrieva G.B., Berengarten M.G., Klyushenkova M.I., Pushnov A.S. Calculation of hydrodynamic parameters of regular structured packing. *Chemical and petroleum engineering*, 2005, no. 12, pp. 5–9. In Rus.
14. Rzehak R., Krepper E. Euler-Euler simulation of mass-transfer in bubbly flows. *Chemical Engineering Science*, 2016, no. 22, pp. 459–468.
15. Semenov I.A., Pokrovskaya M.A. Estimating the parameters of  $\gamma$ -models for binary mixtures from surface tension data. *Theoretical foundations of chemical engineering*, 2014, no. 1, pp. 90–95.
16. Balchugov A.V., Vasilev A.V., Kuzora I.E. *Regulyarnaya nasadka dlya teplo- i massoobmennykh apparatov* [Regular packing for heat and mass transfer devices]. Patent RF no. 2452560, 2012.
17. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. *Primery i zadachi po kursu protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii* [Examples and problems in the processe and apparatus of chemical technology course]. Moscow, Alyans Publ., 2007. 576 p.
18. Kagan A.M., Yudina L.A., Pushnov A.S. Neregulyarnaya metallicheskaya nasadka GIAP-N3 i nekotorye aspekty ee promyshlennogo ispolzovaniya [Irregular metal packing GIAP-H3 and some aspects of its industrial use]. *Khimicheskaya promyshlennost*, 2001, no. 5, pp. 43–46.
19. Podoplelov E.V., Semenov I.A., Bizimov V.V., Lushev A.I. Mass transfer coefficients in liquid when dissolving carbon dioxide bubbles under acoustic effects. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskyy progress*, 2009, no. 1, p. 27. In Rus.
20. Andreenko M.V., Ignatev D.N., Museva T.N., Balchugov A.V. Gi-dravlicheskie ispytaniya dvukh modifikatsy elementa regul'yarnoy nasadki [Hydraulic testing of two modifications of the regular packing element]. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya: Materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proceedings of the All-Russia scientific-technical conference. Chemistry and chemical technology]. Angarsk, 2016. pp. 3–6.

Received: 30 September 2016.

#### Information about the authors

**Matvey V. Andreenko**, postgraduate student, Angarsk State Technical University.

**Alexey V. Balchugov**, Dr. Sc., Vice-rector for research, Angarsk State Technical University.

**Dmitriy A. Dubrovsky**, Cand. Sc., the head of the Joint-stock company «Angarsk petrochemical company».

**Valeriy V. Korobochkin**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 552.143

## СЕДИМЕНТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СРЕДНЕ-ПОЗДНЕОКСФОРДСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ КАЗАНСКОЙ ГРУППЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЯ КЕРНА (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

Кравченко Григорий Геннадьевич<sup>1</sup>,

KravchenkoGG@tomsknipi.ru

Габова Ксения Валерьевна<sup>1,2</sup>,

GabovaKV@tomsknipi.ru

<sup>1</sup> ОАО «ТомскНИПИнефть»,  
Россия, 634027, г. Томск, пр. Мира, 72.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность работы** определяется высокой фациальной неоднородностью горизонта Ю<sub>1</sub> на территории Казанской группы месторождений.

**Целью исследования** является детальное выяснение условий формирования надугольной толщи для построения седиментационной модели месторождений.

Литолого-фациальный анализ выполнен по стандартным методикам: в первую очередь формулировались общие предпосылки накопления осадка (стратиграфия, тектоника, история геологического развития), на следующем этапе проводился собственно литолого-фациальный анализ, который включал в себя детальное изучение пород и выявление основных литотипов, выделение «реперных» и диагностику «нереперных» фаций.

Приводятся результаты седиментологических исследований надугольной толщи по керну скважин Казанского нефтегазоконденсатного, Болтного и Западно-Сомовского нефтяных месторождений Томской области. Детально изучено и уточнено строение надугольной толщи васюганского горизонта, включающей продуктивные пласты Ю<sub>1</sub><sup>1</sup> и Ю<sub>2</sub><sup>2</sup>. Установлено, что отложения формировались в прибрежно-морских условиях, где основными движущими силами переноса и накопления терригенного материала являлись приливно-отливные течения и волнение моря. С позиций цикличности выделены 4 пачки, слагающие толщу, и построены карты толщин с учётом их фациальной неоднородности. Установлена общая трансгрессивная направленность в процессе образования пачек, связанная с начавшейся в среднем оксфорде обширной трансгрессией на территории всей Западной Сибири. Отличия в фациальном облике пачек № 1–4 обусловлены колебаниями относительного уровня моря более мелкого порядка. Впервые проведено комплексное изучение кривой слоистости на пространственно ориентированном керне для выявления направления палеотечений и характера их изменений по разрезу. Внесено предложение по переиндексации пластов на Болтном месторождении, так как на данный момент индексация пластов, представляющих на Болтном и Казанском месторождении единые в генетическом плане тела, не совпадает – пласт, индексируемый в настоящее время как Ю<sub>1</sub><sup>1</sup>, следует индексировать как Ю<sub>2</sub><sup>2</sup>.

### Ключевые слова:

Прибрежно-морские фации, васюганский горизонт, надугольная толща, литолого-фациальный анализ, ориентированный керн, седиментационная модель.

В настоящее время васюганский горизонт на территории Томской области является одним из основных объектов разработки для добычи нефти и газа, а также продолжает оставаться перспективным объектом для поисково-разведочных работ. В этих условиях для снижения неопределённостей при оценке резервуаров необходимо проводить детализацию и уточнение известных представлений о геологическом строении месторождений. На изучаемых месторождениях данный горизонт характеризуется высокой фациальной неоднородностью [1, 2], что является причиной резкой, часто непредсказуемой изменчивости толщин продуктивных пластов, затрудняет их межскважинную корреляцию и в конечном итоге определяет **актуальность** настоящей работы.

В качестве **объекта исследований** были выбраны терригенные отложения верхней части васюганского горизонта Казанского нефтегазоконденсатного, Болтного и Западно-Сомовского нефтяных месторождений, расположенных в юго-восточной части Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции на территории Парабельского района

Томской области в пределах Пудинского нефтегазоносного района Васюганской нефтегазоносной области. В структурном отношении месторождения Казанской группы расположены в юго-восточной части Нюрольской впадины в пределах положительной структуры второго порядка – Калгачского мезовыступа. В геологическом строении района принимают участие палеозойские образования доплатформенного комплекса и мезозойско-кайнозойские отложения осадочного чехла [3].

Согласно стратиграфической схеме района [4] территория исследований относится к границе Пурпейско-Васюганского и Сильгинского структурно-фациальных районов, где в составе васюганского горизонта происходит взаимный переход васюганской и наунакской свит. Это определяет сложность объекта исследований в фациальном отношении, однако, в практике геологических работ он обычно рассматривается как относящийся к васюганской свите. По традиционным представлениям верхневасюганская подсвита (объект исследований расположен в верхней части васюганской свиты) разделяется реперными пластами углей на

три толщи – подугольную, межугольную и надугольную [4–5]. В данном случае наибольший интерес представляет собой последняя, самая верхняя, надугольная толща, к которой приурочены продуктивные на нефть и газ пласты Ю<sub>1</sub><sup>1</sup> и Ю<sub>1</sub><sup>2</sup>, обладающие хорошими коллекторскими свойствами. Лучше всего представлена керном надугольная толща; под- и межугольные толщи в большинстве скважин не вскрыты либо вскрыты не полностью, только в самой верхней части.

По данным спорово-пыльцевого и микропалеонтологического анализов, выполненных в лаборатории микропалеонтологии ТГУ, возраст изучаемых отложений определяется как средний и поздний оксфорд. Причем отложения позднего оксфорда (J<sub>3</sub>ox<sub>3</sub>) соответствуют пласту Ю<sub>1</sub><sup>1</sup>, а среднего оксфорда (J<sub>3</sub>ox<sub>2</sub>) – пласту Ю<sub>1</sub><sup>2</sup> [6].

Основной *целью* данного исследования являлось выяснение особенностей формирования сложной по строению надугольной толщи Казанской группы месторождений и построение для неё актуальной седиментационной модели, а также получение новых данных о палеогеографии района работ. В *задачи* исследования входило детальное изучение всего имеющегося в кернохранилище ОАО «ТомскНИПИнефть» кернового материала и определение его фациальной принадлежности с целью последующих палеогеографических реконструкций. В ходе исследования впервые для данного района по анализу пространственно ориентированного керна были выявлены направления палеотечений. Ориентирование керна в рамках данной работы было выполнено палеомагнитным методом по заказу Лаборатории физики пласта ОАО «ТомскНИПИнефть» в Томском политехническом университете под руководством В.П. Меркулова

Достоверность нижеизложенной информации обеспечивается большим объемом *фактического материала*. В ходе исследования авторами было выполнено детальное макроскопическое описание более 1500 м керна 29 скважин, значительная часть которого характеризуется высоким процентом выноса (>90 %), большим диаметром (80–100 мм), а также продольно распилена, после чего был проведен литолого-седиментологический анализ. Привлекались результаты петрографического изучения шлифов, гранулометрического и рентгенофазового анализов, по данным которых установлено, что отложения пласта Ю<sub>1</sub><sup>1</sup> представлены мелкозернистыми и среднезернистыми мезомиктовыми кварцевыми, реже полевошпатово-кварцевыми песчаниками с поровым каолининовым цементом, реже порово-плёночным гидрослюдистым и хлоритовым цементом. Коллекторы пласта Ю<sub>1</sub><sup>2</sup> представлены в подавляющем большинстве мелкозернистыми полевошпатово-кварцевыми граувакковыми песчаниками с поровым каолининовым и плёночно-поровым гидрослюдистым цементом, реже встречаются средне-мелкозернистые разности, по составу относящиеся к мезомиктовым кварцевым и граувакковым аркозовым песчаникам.

Выполнение фациального анализа керна проходило по стандартным *методикам*, которые предполагают детальное изучение структурных особенностей осадка, его текстур, окраски, включений флоры и фауны, ихнофоссилий, типов слоевых границ и т. д., а также наблюдение за характером изменчивости перечисленных признаков по разрезу [7–19]. Первичные структуры и текстуры осадочных пород являются главными характерными чертами, дающими информацию об условиях и способах переноса и осаждения терригенного материала. Фациальная принадлежность отложений определяется с учётом всех вышеперечисленных признаков, среди которых основополагающим является размер обломочных зерен, поскольку именно он определяется гидродинамическими условиями, преобладавшими в момент его отложения. Также особое внимание уделяется изучению слойчатых текстур, являющихся своеобразными индикаторами энергетических условий среды во время отложения обломочного материала. При диагностике обстановок осадконакопления в первую очередь формулируются общие предпосылки накопления осадка – стратиграфия, тектоника, история геологического развития, изучаемые по литературным источникам и производственным отчётам. На следующем этапе проводится собственно литолого-фациальный анализ, который включает в себя детальное изучение пород, выделение сначала основных литотипов, затем относительно простых («реперных») фаций, таких как угли, прослой с характерным набором ихнофоссилий и т. п., и диагностика всех остальных, более сложных («нереперных») фаций.

В результате литолого-фациального анализа установлено, что продуктивные отложения формировались в прибрежно-морских условиях в области повышенной активности гидродинамического режима, а основными движущими силами переноса и накопления терригенного материала продуктивных пластов были приливно-отливные течения и волнение моря. Их индикаторами являются довольно специфические слойчатые текстуры в песчаных породах, образующиеся при поступательном (течение) или колебательном (волнение) движении воды, например однонаправленная слойчатость или разнонаправленная косая слойчатость соответственно. Одним из характерных признаков приливно-отливных течений является чередование направлений наклона косых слоек в смежных косослойчатых сериях, обусловленное ритмичной сменой приливно-отливных течений. Выявлены закономерности в строении разреза, выражающиеся в его цикличности. Следует заметить, что границы продуктивных пластов, выделенные по данным ГИС, не всегда совпадают с границами осадочных циклов.

Обобщая результаты литолого-фациального анализа всех изученных отложений, вплоть до подошвы маломощной барабинской пачки, фиксируемой во всех исследуемых разрезах и являющейся

**Таблица 1.** Краткая характеристика пачек, выделенных в результате литолого-фациального анализа керна

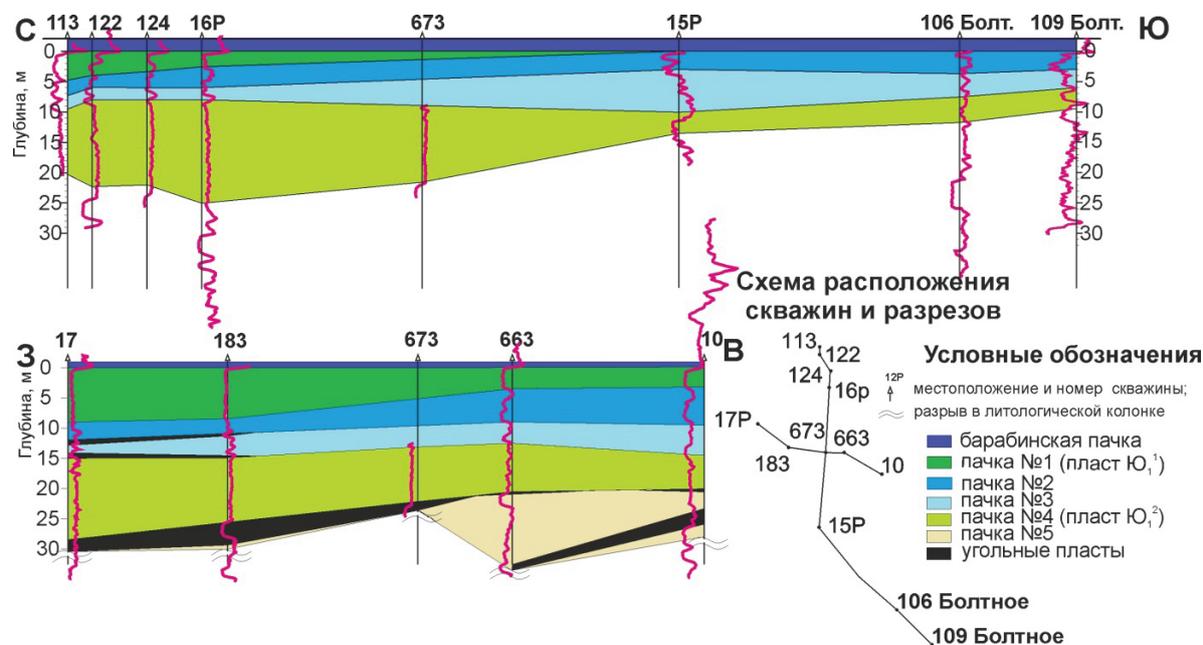
**Table 1.** Brief characteristic of members studied in lithofacies analysis of core

№ пачки Member	Породы Rocks	Фации (в порядке убывания частоты встречаемости) Facies (in decreasing order of frequency)	Обстановка седиментации Environment of deposition	Пласт Layer
1	Песчаники средне- и мелкозернистые, аргиллиты Medium- and fine-grained sandstones, shales	Приливный канал, приливная дельта, пляж, лагуна, лагунный пляж Tidal channel, tidal delta, beach, lagoon, lagoonal beach	Субаквальная часть приливо-отливного барьерного побережья Subaquatic part of the tide-ebb barrier sea shore	Ю <sub>1</sub> <sup>1</sup> J <sub>1</sub> <sup>1</sup>
2	Аргиллиты, ракушнякаи, алевролиты, песчаники Shales, shell rocks, silts, sandstones	Лагуна, лагунный пляж, приливная дельта, приливный канал Lagoon, lagoonal beach, tidal channel, tidal delta	Лагунная часть приливо-отливного барьерного побережья Lagoonal part of tide-ebb barrier sea shore	–
3	Угли, аргиллиты, алевролиты, песчаники тонкозернистые Coals, shales, silts, fine-grained sandstones	Марш, приморское болото, ватт, лагуна Marsh, coast swamp, watten, lagoon	Субаэральная часть приливо-отливной равнины, участками осушаемая Subaerial part of the tide-ebb coast plain, partially dried	–
4	Песчаники средне-мелкозернистые, тонкозернистые, алевролиты, аргиллиты Medium- and fine-grained sandstones, silts, shales	Приливный канал, приливная дельта, пляж, ватт, марш Tidal channel, tidal delta, beach, watten, marsh	Субаквальная часть приливо-отливного барьерного побережья Subaquatic part of the tide-ebb barrier sea shore	Ю <sub>1</sub> <sup>2</sup> J <sub>1</sub> <sup>2</sup>
5	Угли, аргиллиты, песчаники тонкозернистые Coals, shales, fine-grained sandstones	Болото, пойма, русло дельтового рукава, прирусловой вал, конус прорыва, озеро Swamp, floodplain, delta distributary, channel bar, crevasse splay, lake	Аллювиальная озёрно-болотная равнина Alluvial lake-swamp floodplain	–

ся региональным репером (традиционно индексируется как пласт Ю<sub>1</sub><sup>0</sup>), снизу вверх выделяется 5 пачек (табл. 1, рис. 1).

Нижняя пачка – № 5 сложена континентальными осадками. Они полностью вскрыты только в двух скважинах (15P и 18P) Казанского месторождения и представлены выдержанными пластами

углей и аргиллитов, иногда с прослоями алевролитов и тонкозернистых песчаников, образованными в условиях озёрно-болотной равнины. В целом пачка № 5 представляет собой завершение крупного регрессивного этапа развития территории и отделяется от вышележащих пачек № 1–4 чётко фиксируемой в керне эрозионной границей (рис. 2).



**Рис. 1.** Разрез верхней части васюганского горизонта Казанского и Болтного месторождений, выровненный на его кровлю (по дошву барабинской пачки)

**Fig. 1.** Cross-section of upper Vasuygan horizon of Kazanskoe and Boltnoe oilfields leveled on its bed top (bottom of Barabinskaya member)

Пачки № 1–4, таким образом, представляют собой базальную часть регионального трансгрессивного циклита, формирование которого началось в среднем оксфорде и затронуло всю Западную Сибирь.

Отложения пачек № 1–4 характеризуются набором латерально близких обстановок осадконакопления и, как правило, разделены поверхностями размыва.



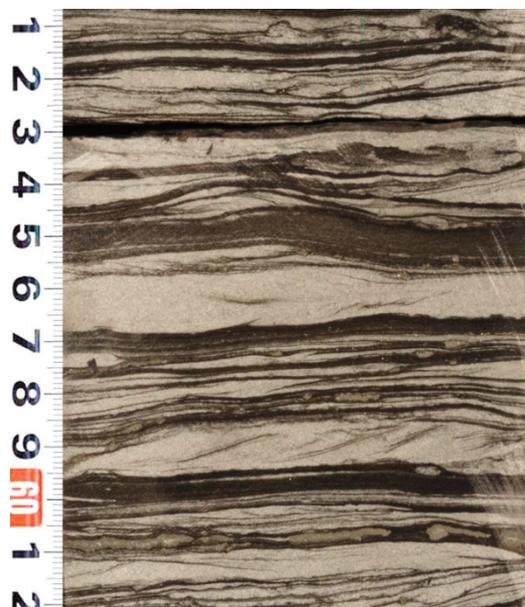
**Рис. 2.** Фото керна – эрозионная граница между пачками №№ 4 и 5 Казанского месторождения. В нижней части фото – уголь; фация приморского болота. В верхней части – песчаник с тонкой субгоризонтальной слоистостью, подчеркнутой углефицированным растительным детритом и являющейся результатом быстрого течения; фация приливного канала. Скв. 122 к. 11 Казанского месторождения Глубина по ГИС 2525,57 м

**Fig. 2.** Photo of the core – the eroded bound between members 4 and 5 of Kazanskoe oilfield. Coal (facies of coastal swamp) is in the bottom part of photo. Sandstone with fine subhorizontal bedding, marked with carbonaceous vegetable detritus as a result of rapid stream – (facies of tidal channel) is in the upper part. Well 122, k. 11 of Kazanskoe oilfield. Depth is 2525,57 m according logging

Отложения пачки № 4 представляют собой преимущественно мелкопесчаные осадки, которые, как показал литолого-фациальный анализ, формировались под преобладающим действием морских приливов и относятся к фациям приливных каналов и связанных с ними приливных дельт (рис. 3). В кровельной части пласта усиливается действие волнений, приводящее к возникновению пляжевых осадков (рис. 4, 5, а). К отложениям этой пачки приурочен продуктивный пласт Ю<sub>1</sub><sup>2</sup>.

При условии положительного привноса осадков, стабильного уровня моря (или при невысокой скорости его опускания) пляж наступает в сторону моря, тогда как уменьшение поступления осадков, поднятие уровня моря или высокая скорость его опускания приводят к миграции береговой линии

в сторону суши. Исходя из этого на Казанской площади на момент формирования пачки № 4 предполагается уклон поверхности осадконакопления с юга на север. Распознавание другой фации пачки № 4 – приливных каналов – позволяет выявить взаимодействие палеотечений и фаций: отложения каналов распространены исключительно в западной части территории, образуя вытянутое с юга на север песчаное тело (рис. 5, б). Отложения приливной дельты имеют более широкое распространение по площади и более или менее выдержанную толщину, которая увеличивается к северу и востоку территории; они как бы окаймляют отложения приливных каналов, образуя тело веерообразной формы (рис. 5, в). Такая морфология тел, образуемых отложениями приливного канала и дельты, указывает на привнос материала в север-северо-восточном направлении, что также подтверждает наличие уклона поверхности с юга на север.



**Рис. 3.** Фото керна – тонкое переслаивание аргиллита и песчаника мелко-тонкозернистого. Встречаются следы биотурбации. В песчанике наблюдаются плохо выдержанные по форме и наклону косослойчатые серии, нередко с разнонаправленным падением косых слойков в смежных сериях (в центре фото), что весьма характерно для приливно-отливных обстановок. Фация приливной дельты. Скв. 122 к. 11 Казанского месторождения. Глубина по ГИС 2521,20 м. Пласт Ю<sub>1</sub><sup>2</sup>

**Fig. 3.** Photo of the core – fine layering of shales and fine-grained sandstones with traces of bioturbation. Series of subtle cross-bedding patterns with multidirectional dipping of cross layers in adjacent series are observed in sandstone (in center of photo) featured for tide-ebb environments. Tidal delta facies. Well 122, k. 11 of Kazanskoe oilfield. Depth is 2521,20 m according logging. Layer J<sub>1</sub><sup>2</sup>

В пачке № 4 перспективным для обнаружения коллекторов с хорошими ФЕС (фильтрационно-емкостные свойства) зонам относятся песчаные отложения пляжа, распространенные в северной

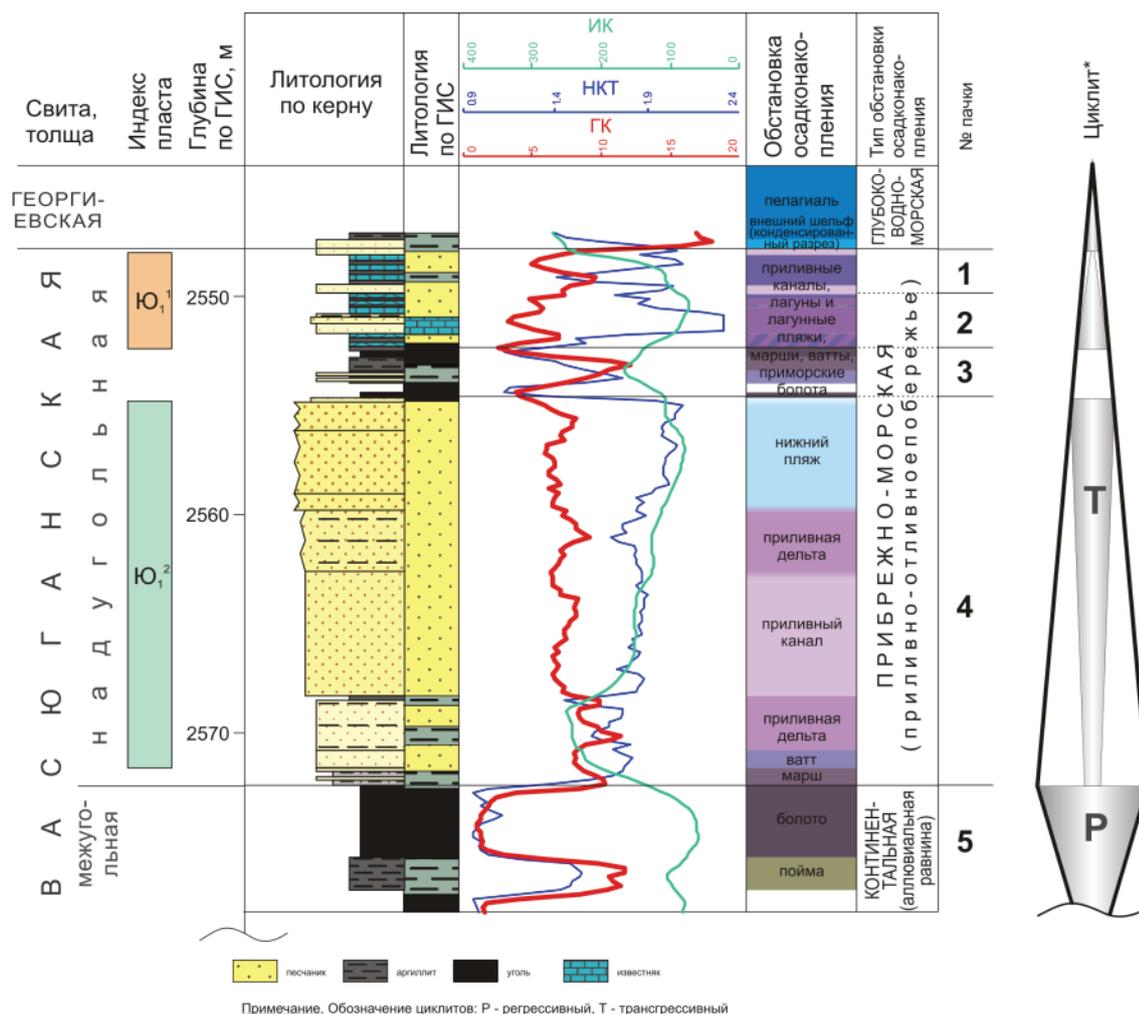


Рис. 4. Фрагмент литологической колонки скв. № 147 Казанского месторождения

Fig. 4. Fragment of lithological column for the well № 147 of Kazanskoe field

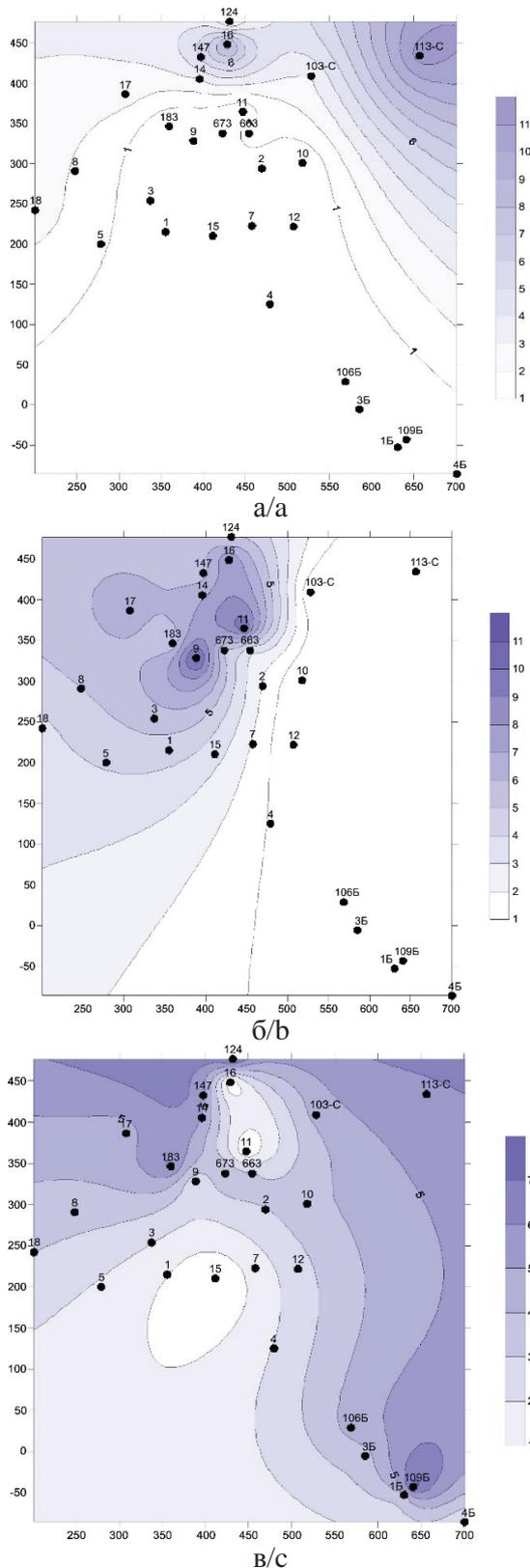
части исследуемой территории, чуть менее перспективными являются отложения приливных каналов и дельт. Эффективная толщина выделяемого в этой пачке пласта Ю<sub>1</sub><sup>2</sup> колеблется от 1,9 м в скв. 4Р Болтного месторождения до 17,3 м в скв. 11П Западно-Сомовского месторождения.

**Пачка № 3**, в сравнении с нижележащей, имеет регрессивную направленность процесса седиментации и отражает постепенное отступление моря с территории исследования или его стабилизацию на фоне прежних скоростей поступления осадка. Пачка сложена субаэральными осадками ваттов и желобов стока, маршей и приморских болот. Как правило, во всех скважинах в кровле и подошве этой пачки прослеживаются угольные пласты толщиной до 1 м. Толщина отложений пачки № 3 достигает 8,3 м в центральной части и постепенно снижается к периферии до 0,7 м.

Отложения пачки № 2 отражают этап повторного наступления моря и представлены преимущественно глинистыми осадками лагун. Весьма характерным признаком этой пачки является значи-

тельное количество прослоев ракушняка, образованного за счет раковинного детрита, привнесённого в периоды штормов с окраин лагуны – лагунных пляжей. Отложения пачек № 3 и 2 соответствуют перемычке между пластами Ю<sub>1</sub><sup>1</sup> и Ю<sub>1</sub><sup>2</sup>.

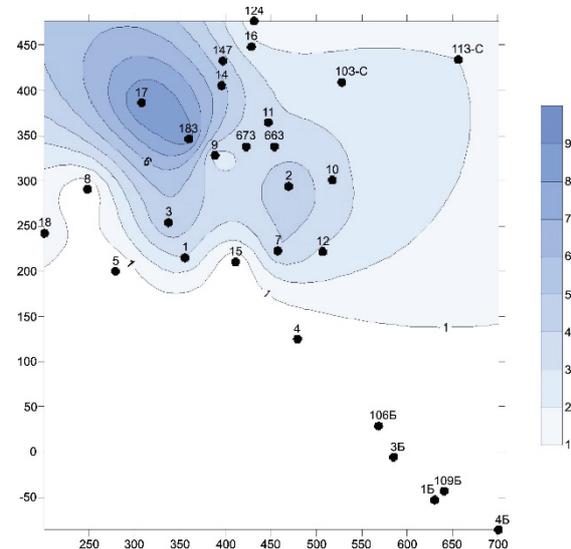
**Пачка № 1** накапливалась при продолжающейся трансгрессии и сложена в основном песчаными осадками приливных каналов и дельт, в северной части Казанского месторождения (скв. 16Р) также встречаются осадки пляжей и лагун. Они залегают на отложениях пачки № 2 с размывом. Гидродинамические условия их формирования сходны с таковыми пачки № 4. Песчаные отложения пачки № 1 в полном объеме соотносятся с пластом Ю<sub>1</sub><sup>1</sup>. В пласте Ю<sub>1</sub><sup>1</sup> для поисков песчаных тел с благоприятными в фациальном отношении литологическими характеристиками отнесены зоны, формировавшиеся в условиях прибрежно-морской равнины с высокой и средней гидродинамической активностью среды осадконакопления – пляжи и приливные каналы. Как показывает карта толщин, такие зоны локализованы в се-



**Рис. 5.** Карты толщин отложений пачки № 4 (пласт  $J_4^2$ ) по данным изучения керн: а – пляж, б – приливный канал, в – приливная дельта

**Fig. 5.** Isopachous map of the member 4 (layer  $J_4^2$ ) on the core data: a is the shore front; b is the tidal channel; c is the tidal delta

верной части Казанского и на Западно-Сомовском месторождениях (рис. 6). Максимальная общая толщина пласта  $J_1^1$  составляет 9 м в скв. 17Р Казанского месторождения и с севера на юг постепенно уменьшается до полного её исчезновения в скв. 15Р Казанского и на Болтном месторождении.



**Рис. 6.** Карта толщин отложений пачки № 1 (пласт  $J_1^1$ )

**Fig. 6.** Isopachous map of the member 1 (layer  $J_1^1$ )

Таким образом, выявленные прямым методом – с помощью фациального анализа продольно распиленного керн – существующие пачки являются частью трансгрессивного циклита более крупного порядка и в целом хорошо соотносятся с надугольной толщей. Некоторые исследователи считают, что на заключительном этапе формирования надугольной толщи отложения в области палеоподнятий были выведены на дневную поверхность и подвергнуты существенной денудации на юге Казанской площади и Болтном месторождении. Однако по керну отчётливо видно, что на Казанском и Западно-Сомовском месторождениях барабинская пачка (пласт  $J_1^0$ ) залегает согласно на пачке № 1, размыва на данном участке не отмечается, следовательно, её размыв на Болтном месторождении исключается. Можно предположить, что отсутствие отложений этой пачки на юге Казанского и на Болтном месторождении произошло по причине восстановившегося наклона территории с юга на север.

Следует заметить, что в настоящее время на Болтном месторождении пласт  $J_1^2$ , занимающий положение в составе пачки № 4, проиндексирован как  $J_1^1$ . Пласт  $J_1^2$  относится к отложениям морского генезиса, а по актуальным в настоящее время пластовым разбивкам на Болтном месторождении он представлен отложениями континентальной группы фаций (входящими в пачку № 5). Таким образом, индексация пластов, представляющих единые в генетическом плане тела, на Болтном и Казанском месторождениях не совпадает.

Такое несоответствие может привести к существенным ошибкам при геометризации тел и подсчете запасов, поскольку понимание архитектуры залежи является залогом уверенной разработки месторождения. В связи с этим предлагается провести переиндексацию пластов Болтного месторождения, как показано в табл. 2.

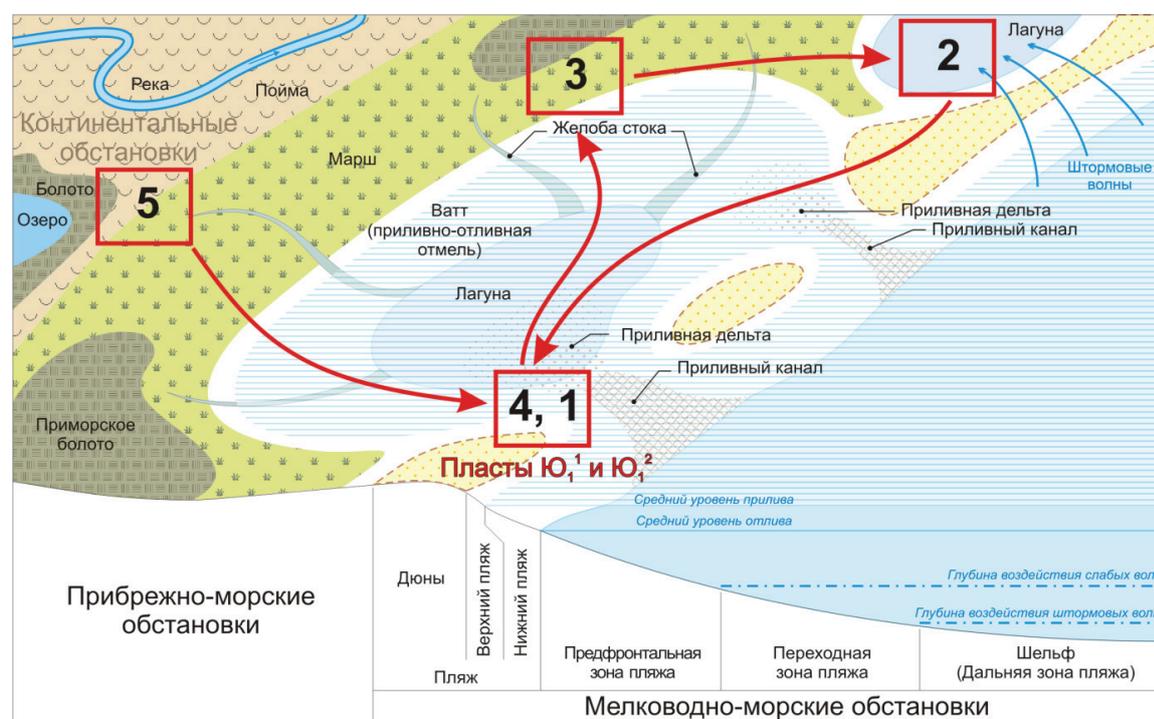
**Таблица 2.** Индексация пластов на Болтном месторождении  
**Table 2.** Indexation of reservoirs for Boltnoe oilfield

Индекс пласта принятый Accepted layer index		Индекс пласта, предлагаемый на Болтном месторождении Proposed layer index for Boltnoe field	Пачка Member
На Казанском месторождении Kazanskoe oilfield	На Болтном месторождении Boltnoe oilfield		
$Ю_0^0/J_0^0$	$Ю_0^0/J_0^0$	$Ю_0^0/J_0^0$	Барабинская Barabinskaya
$Ю_1^1/J_1^1$	–	Пласт отсутствует No layer	1
–	–	–	2
–	–	–	3
$Ю_2^2/J_2^2$	$Ю_1^1/J_1^1$	$Ю_2^2/J_2^2$	4
–	$Ю_2^2/J_2^2$	–	5

История осадконакопления для верхней части васюганского горизонта на Казанской группе месторождений может быть проиллюстрирована авторской схемой, приведённой на рис. 7.

Осадконакопление изучаемого интервала разреза начинается с образования континентальной пачки № 5, соответствующей межугольной толще. Залегающие выше пачки № 1–4 накапливались в условиях начавшейся в среднем оксфорде обширной трансгрессии, охватившей территорию всей Западной Сибири. Отличия в фациальном облике пачек № 1–4 обусловлены колебаниями относительного уровня моря более мелкого порядка. В целом обстановки осадконакопления для них можно охарактеризовать как прибрежно-морскую и наиболее близкую к суше часть мелководно-морской.

Для получения дополнительной информации о генезисе изучаемых отложений были сделаны множественные замеры косой слоистости песчаников пласта  $Ю_1^1$  (пачка № 4) в ориентированном палеомагнитным методом керне скважины № 147 Казанского месторождения. В песчаниках пласта  $Ю_2^2$ , в отличие от пласта  $Ю_1^1$ , для которого характерна биотурбация осадка и почти полное отсутствие косой слоистости, широко распространены разнообразчатые косослойчатые текстуры. Их изучение по ориентированному керну позволяет определить точный азимут палеотечения для каждой конкретной точки наблюдения. Косые слои во всех случаях будут наклонены в направлении движения среды, из которой выпадает осадок. Таким образом, изучение характера и ориентировки слоистости, сопровождаемое массовыми замерами

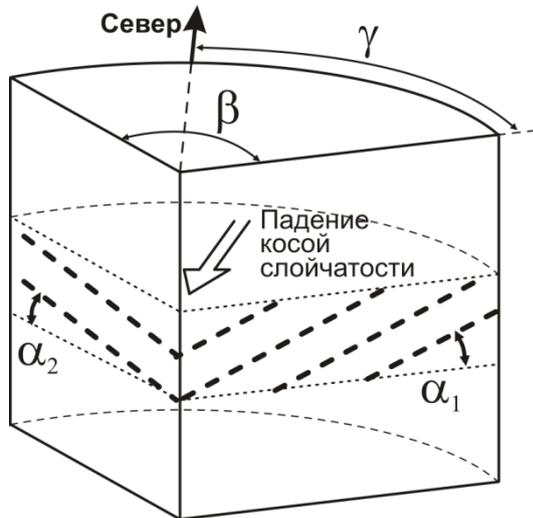


**4, 1** - положение района исследований и номера пачек

**Рис. 7.** Положение района исследований на моменты формирования соответствующих пачек. Стрелками показана последовательность смены обстановок на территории исследования

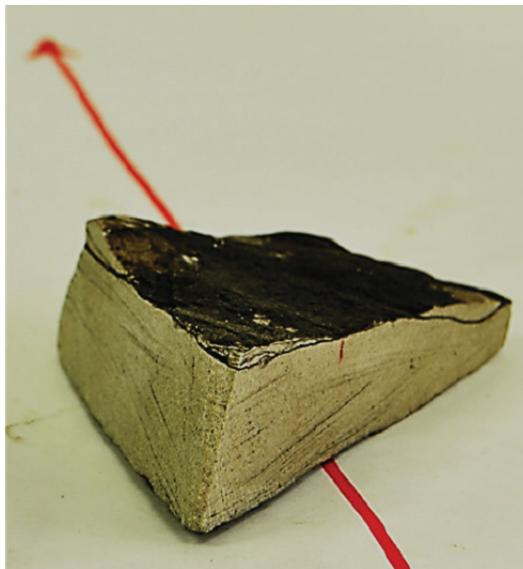
**Fig. 7.** Location of the studied area at the moment of formation of the appropriate members of Percarbonic Suite. Arrows point the sequence of changing the environments

ми, позволяет использовать получаемые результаты для палеогеографических реконструкций: судить о направлениях течений, местоположении области сноса, направлении наклона территории.



**Рис. 8.** Схема обозначения параметров кривой слоистости в образце керна с двумя продольными спилами:  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы падения кривой слоистости;  $\beta$  – угол между спилами 1 и 2;  $\gamma$  – угол между одним из спилов и севером

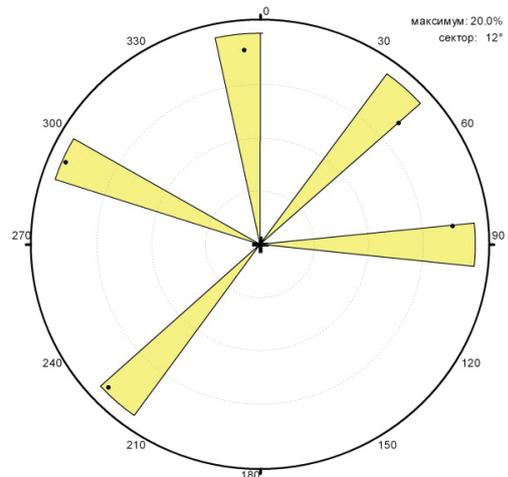
**Fig. 8.** Sketch definition for cross-bedding in a core sample with two oblong cuts:  $\alpha_1$  and  $\alpha_2$  are the angles of inclination of cross bedding;  $\beta$  is the angle between cuts 1 and 2;  $\gamma$  is the angle between one cut and North meridian



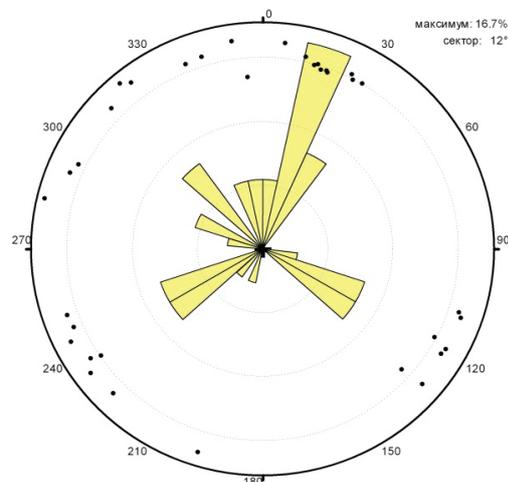
**Рис. 9.** Фото фрагмента керна с двумя продольными спилами, на плоскостях которых наблюдается кривая слоистость. Красной стрелкой продублировано направление на север (отмечено на керна), определённое палеомагнитным методом. Контрастность изображения повышена

**Fig. 9.** Fragment of photo of the core with two oblong cuts with cross bedding on the planes. North direction, determined by the palaeomagnetic method, is pointed (on the core) by the red arrow. Contrast of image is increased

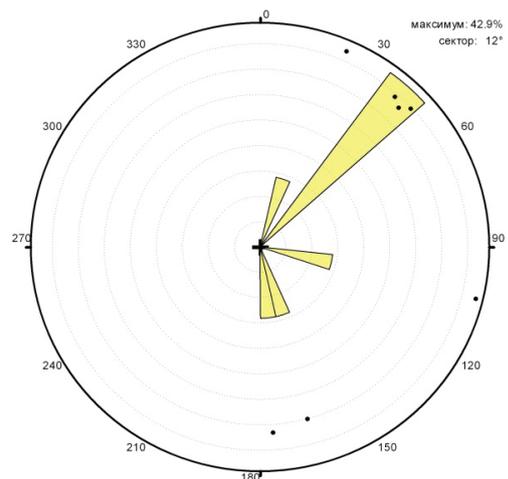
**а/а**



**б/б**



**в/с**



**Рис. 10.** Розы-диаграммы направлений падения плоскостей кривой слоистости для фациальных обстановок: а – нижний пляж; б – приливный канал; в – приливная дельта

**Fig. 10.** Rose-diagrams of the dipping direction of cross-bedded layering for facial environments: a is the foreshore; b is the tidal channel; c is the tidal delta

Для песчаников пласта Ю<sub>1</sub><sup>2</sup> были выполнены замеры элементов косой слойчатости, видимых по керну, распиленному в двух продольных плоскостях. Схема замеряемых на керне пространственных элементов приведена на рис. 8. Наличие двух (желательно перпендикулярных или близких к этому) продольных спилов керна (рис. 9) необходимо для снятия замеров углов наклона косой слойчатости с двух проекций её плоскости. Это требуется для дальнейшего расчёта с использованием данных по пространственной ориентировке керна истинного азимута падения плоскости косой слойчатости и угла падения косых слоёв.

По результатам замеров были составлены розы-диаграммы для каждой из выделенных обстановок: на диаграммах откладывался процент встречаемости косослойчатых серий данного направления (рис. 10).

Обстановка формирования осадков нижнего пляжа характеризуется смешением различных систем течений, их неустойчивостью по направлению и во времени и интенсивной волновой переработкой осаждаемого материала. Вследствие этого замеры косой слойчатости отложений пляжа, вынесенные на розу-диаграмму, представляют собой неупорядоченные (полимодальные) распределения (рис. 10, а). Для отложений приливных каналов и дельт характерна унимодальная роза-диаграмма наклона косых слоёв (рис. 10, б, в), что определяется относительной силой приливов и отливов, направленных как в сторону берега, так и от него. По мнению В.А. Гроссгейма [20], по форме розы можно судить о рельефе дна бассейна осадконакопления. При плоском дне, т. е. при меньших скоростях донных течений, розы оказываются очень расплывчатыми, а течения очень изменчивыми. Смена направлений течений связывается в

общем случае с азимутальным изменением наклона на дне, вызываемым тектоническими подвижками. Выявленное в результате исследований косой слойчатости направление течения (север-северо-восточное) хорошо согласуется с направлением, установленным в ходе анализа карт толщин.

### Заключение

В ходе исследования авторами выполнен литолого-фациальный анализ керна месторождений Казанской группы. Проанализированы особенности разрезов скважин с точки зрения цикличности их строения. Так, было установлено, что во всех изученных скважинах наблюдается определённая схожесть в особенностях среды осадконакопления, а именно цикличность, которая позволяет уверенно сопоставлять между собой разрезы скважин вне зависимости от состава и толщин слагающих их осадков. Подход к изучению разрезов, основанный на выявлении цикличности, позволил типизировать разрез Казанской группы месторождений на пачки, соответствующие циклам осадконакопления. Для каждой пачки были построены карты толщин, позволившие сформировать фациальную модель средне-позднеоксфордских отложений района работ и сделать выводы об их палеогеографических условиях формирования.

В результате текстурного анализа ориентированного керна была получена новая информация о направлениях палеотечений. Эта информация хорошо согласовалась с выявленными авторами ранее закономерностями распространения песчаных тел и была учтена при построении седиментационной модели месторождений Казанской группы.

По результатам работы даны рекомендации по переиндексации пластов горизонта Ю<sub>1</sub> на Болтном месторождении.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белозёров В.Б. Влияние фациальной неоднородности терригенных коллекторов на разработку залежей углеводородов // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 123–130.
2. Белозёров В.Б. Палеогеографические особенности формирования нефтеносных пластов васюганской свиты Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 67–72.
3. Запивалов Н.П. Геологическое строение Казанского газоконденсатного месторождения // Нефть и газ Тюмени: труды Зап-СибНИГНИ. – 1970. – Вып. 6. – С. 39–43.
4. Решение 6-го Межведомственного стратиграфического совещания по рассмотрению и принятию уточнённых стратиграфических схем мезозойских отложений Западной Сибири. – Новосибирск: СНИИГиМС, 2004. – 114 с.
5. Даненберг Е.Е., Белозеров В.Б., Брылина Н.А. Геологическое строение и нефтегазоносность верхнеюрско-нижнемеловых отложений юго-востока Западно-Сибирской плиты (Томская область). – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 291 с.
6. Биостратиграфия и условия осадконакопления келловей-верхнеюрских отложений Сильгинского структурно-фациального района Западной Сибири / Е.В. Полковникова, Г.Г. Кравченко, Г.М. Татьяна, О.Н. Костеша, К.П. Лялюк, В.А. Коновалова, В.А. Чеканцев // Юрская система России: проблемы стратиграфии и палеогеографии. V Всероссийское совещание. – Тюмень, 2013. – С. 172–177.
7. Курчиков А.Р., Бородкин В.Н. Характеристика геологического строения и нефтегазоносности юрского нефтегазоносного комплекса Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2015. – 140 с.
8. Leeder M.R. Sedimentology: Process and product. – London: Allen & Unwin, 1982. – 344 p.
9. Reineck H.E., Singh I.B. Depositional Sedimentary Environments – with Reference to Terrigenous Clastics. – New York: Springer Verlag, 1973. – 439 p.
10. Reading H.G. Sedimentary environments and facies. – Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1978. – 557 p.
11. Selley R.C. Applied Sedimentology. – San Diego, California, USA: Academic Press, 2000. – 523 p.
12. Einsele G. Sedimentary basins: Evolution, facies, and sediment budget. – Berlin: Springer-Verlag, 2000. – 792 p.
13. Ekdale A.A., Bromley R.G., Pemberton S.G. Ichnology – the use of trace fossils in Sedimentology and stratigraphy. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. SEPM Short Course 15. – Tulsa, Oklahoma, United States, 1984. – 317 p.

14. Trace Fossils as Indicators of Sedimentary Environments / Eds. D. Knaust, R.G. Bromley // *Developments in Sedimentology*. – Amsterdam: Elsevier, 2012. – V. 64. – 960 p.
15. Кравченко Г.Г. Реперные поверхности в разрезе васюганского горизонта по данным изучения керна (на примере юго-востока Западной Сибири) // *Эволюция осадочных процессов в истории Земли: материалы 8-го Всероссийского литологического совещания*. – М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2015. – Т. II. – С. 405–408.
16. Posamentier H.W., Allen G.P. Variability of the sequence stratigraphic model: effects of local basin factors. – *Sedimentary Geology*. – 1993. – V. 86. – P. 91–109.
17. Gardiner A.R. *Reservoir Sedimentology (Distance Learning Notes)*. – Edinburgh: Heriot-Watt University, 2003. – 64 p.
18. Чернова О.С. *Седиментология резервуара*. – Томск: Изд-во ЦППС НД, 2014. – 295 с.
19. Габова К.В. Применение пространственно ориентированного керна для палеогеографических реконструкций (Казанское месторождение) // *Трофимуковские чтения – 2015: материалы Всероссийской молодежной научной конференции с участием иностранных ученых*. – Новосибирск: РИЦ НГУ, 2015. – С. 24–27.
20. 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.

*Поступила 15.08.2016 г.*

#### **Информация об авторах**

**Кравченко Г.Г.**, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией седиментологии ОАО «ТомскНИПИнефть».

**Габова К.В.**, аспирант кафедры геологии и разработки нефтяных месторождений Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета; младший научный сотрудник сектора седиментологии ОАО «ТомскНИПИнефть».

UDC 552.143

## SEDIMENTOLOGICAL MODEL OF MID- AND LATE-OXFORDIAN DEPOSITS IN THE KAZANSKOE GROUP OF OILFIELDS ON THE RESULTS OF CORE INVESTIGATION (WEST SIBERIA)

Grigory G. Kravchenko<sup>1</sup>,  
KravchenkoGG@tomsknipi.ru

Ksenia V. Gabova<sup>1,2</sup>,  
GabovaKV@tomsknipi.ru

<sup>1</sup> JSC «TomskNIPIneft»,  
72, Mira Avenue, Tomsk, 634027, Russia.

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**Relevance** of the research is determined by high rate of facies heterogeneity of J<sub>1</sub> horizon within the Kazanskoe group oil fields.

**The aim** of the study is the detailed clarification of the formation conditions of the Percarbonic sequences to construct a sedimentation model of the oilfield.

Lithofacial analysis was carried out according to the standard methods. The general conditions of sediment accumulation (stratigraphy, tectonic, geological history of basin) were formulated, then the actual lithofacial analysis was carried out, including the detailed study of the rocks and allocation of core lithotypes, highlighting and diagnostic of «benchmarked» and «not benchmarked» facies.

The paper introduces the results of sedimentological studies for Percarbonic suit using the core studying of oil and gas deep wells from Kazanskoe, Boltnoe and Zapadno-Somovskoe oilfields of Tomsk region. The authors have studied in details the structure and recurrence of productive reservoirs J<sub>1</sub><sup>2</sup> and J<sub>1</sub><sup>1</sup>. It was ascertained that the deposits were formed in coastal environments, where the tides and wavy motions played the main role in transfer and sedimentations of terrigenous material. Four members of Percarbonic suites of Vasyugan horizon were evaluated according to the cycle sequence and their isopachous maps based on facies heterogeneity were built. General transgression trend in member formation was determined with regard to the beginning of the vast transgression in the mid-Oxfordian time on the territory of West Siberia basin. The distinctions in facial aspects for the studied members 1–4 were determined by the fine order of sea level oscillations. The authors investigated the cross bedding on the spatially oriented core to determine the energy conditions of sediment environments and proposed to re-index the reservoirs of the Boltnoe field, as the current indexation of the members, representing a single body of genetically origin for Boltnoe and Kazanskoe oilfields, does not coincide – the reservoir which is currently indexed as J<sub>1</sub><sup>1</sup>, should be indexed as J<sub>1</sub><sup>2</sup>.

### Key words:

Coastal-marine facies, Vasyugan horizon, Percarbonic suite, lithofacies analysis, oriented core, sedimentation model.

### REFERENCES

1. Belozеров V.B. Effect of facial heterogeneity of clastic reservoirs on the development of hydrocarbon deposits. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 1, pp. 123–130. In Rus.
2. Belozеров V.B. Paleogeographic peculiarities of formation of Vasyugan reservoirs in Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 1, pp. 67–72. In Rus.
3. Zapivalov N.P. Geologicheskoye stroeniye Kazanskogo gazokondensatnogo mestorozhdeniya [Geological structure of the Kazan condensate field]. *Neft i gaz Tyumeni. Tr. ZapSibNIGNI*, 1970, no. 6, pp. 39–43.
4. *Resheniye 6-go Mezhvedomstvennogo stratigraficheskogo soveshchaniya po rassmotreniyu i prinyatiyu utochnennykh stratigraficheskikh skhem mezozoyskikh otlozheniy Zapadnoy Sibiri* [Decision of the 6<sup>th</sup> Interdepartmental Stratigraphic Meeting on consideration and adoption of the refined stratigraphic schemes of Mesozoic deposits of Western Siberia]. Novosibirsk, SNIIG-GiMS Publ., 2004. 114 p.
5. Danenberg E.E., Belozеров V.B., Brylina N.A. *Geologicheskoe stroeniye i neftegazonosnost verkhneyursko-nizhnemelovykh otlozheniy yugo-vostoka Zapadno-Sibirskoy plity (Tomskaya oblast)* [Geological structure and petroleum potential of Upper Jurassic-Lower Cretaceous deposits of the south-east of the West Siberian Plate (Tomsk region)]. Tomsk, TPU Publ., 2006. 291 p.
6. Polkovnikova E.V., Kravchenko G.G., Tatyani G.M., Kostesha O.N., Lyalyuk K.P., Konovalova V.A., Chekantsev V.A. Biostatigrafiya i usloviya osadkonakopleniya kellovey-verkhneyurskikh otlozheniy Silginskogo strukturno-fatsialnogo rayona Zapadnoy Sibiri [Biostratigraphy and depositional environments of Callovian-Upper Jurassic Silginskogo structural-facial region of Western Siberia]. *Yurskaya sistema Rossii: problemy stratigrafii i paleogeografii. V Vserossiyskoye soveshchaniye* [Jurassic System of Russia: problems of stratigraphy and paleogeography. V All-Russia meeting]. Tyumen, 2013. pp. 172–177.
7. Kurchikov A.R., Borodkin V.N. *Kharakteristika geologicheskogo stroeniya i neftegazonosnosti yurskogo neftegazonosnogo kompleksa Zapadnoy Sibiri* [Characteristics of geological structure and oil and gas potential of the Jurassic oil and gas complex of Western Siberia]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2015. 140 p.
8. Leeder M.R. *Sedimentology: Process and product*. London, Aller & Unwin Publ., 1982. 344 p.
9. Reineck H.E., Singh I.B. *Depositional Sedimentary Environments – with Reference to Terrigenous Clastics*. New York, Springer Verlag Publ., 1973. 439 p.
10. Reading H.G. *Sedimentary environments and facies*. Oxford, Blackwell Scientific Publ., 1978. 557 p.
11. Selley R.C. *Applied Sedimentology*. San Diego, California, USA, Academic Press Publ., 2000. 523 p.
12. Einsele G. *Sedimentary basins: Evolution, facies, and sediment budget*. Berlin, Springer-Verlag Publ., 2000. 792 p.
13. Ekdale A.A., Bromley R.G., Pemberton S.G. *Ichnology – the use of trace fossils in Sedimentology and stratigraphy*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Short Course 15. Tulsa, Oklahoma, SEPM Publ., 1984. 317 p.

14. *Trace Fossils as Indicators of Sedimentary Environments*. Eds. D. Knaust, R.G. Bromley. Developments in Sedimentology. Amsterdam, Elsevier, 2012. Vol. 64, 960 p.
15. Kravchenko G.G. Repernye poverkhnosti v razreze vasyuganskogo gorizonta po dannym izucheniya kerna (na primere yugo-vostoka Zapadnoy Sibiri) [Fiducial surface in the section of Vasyuganskoye horizon by the data of studying core (by the example of Western Siberia south-east)]. *Evolyutsiya osadochnykh protsessov v istorii Zemli: materialy 8-go Vserossiyskogo litologicheskogo soveshchaniya* [Evolution of sedimentary processes in the Earth's history: Materials of the 8<sup>th</sup> All-Russian lithological meeting]. Moscow, 2015. pp. 405–408.
16. Posamentier H.W., Allen G.P. Variability of the sequence stratigraphic model: effects of local basin factors. *Sedimentary Geology*, 1993, vol. 86, pp. 91–109.
17. Gardiner A.R. *Reservoir Sedimentology (Distance Learning Notes)*. Edinburgh, Heriot-Watt University Publ., 2003. 64 p.
18. Chernova O.S. *Sedimentologiya rezervuara* [Reservoir sedimentology]. Tomsk, TsPPS ND Publ., 2014. 295 p.
19. Gabova K.V. Primeneniye prostranstvenno orientirovannogo kerna dlya paleogeograficheskikh rekonstruktsiy (Kazanskoye mesotorozhdeniye) [Use of space-based core for paleogeographic reconstructions (Kazan deposit)]. *Trofimukovskiye chteniya-2015: Materialy Vserossiyskoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii s uchastiyem inostrannykh uchenykh* [Trofimuk readings-2015: Proc. of the All-Russian youth scientific conference with participation of foreign scientists]. Novosibirsk, 2015. pp. 24–27.
20. Grossgeym V.A., Beskrovnaya O.V., Gerashchenko I.L. *Metody paleogeograficheskikh rekonstruktsiy (pri poiskakh zalezhey nefi i gaza)* [Methods of paleogeographic reconstructions (when searching for oil and gas fields)]. St. Petersburg, Nedra Publ., 1984. 271 p.

Received: 15 August 2016.

#### Information about the authors

**Grigory G. Kravchenko**, Cand. Sc., head of the laboratory, JSC «TomskNIPIneft».

**Ksenia V. Gabova**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University; junior researcher, JSC «TomskNIPIneft».

УДК 556.166:556.16.06

## УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛОВОДЬЯ БОЛЬШОЙ ВОДНОСТИ И ПРОГНОЗ НАВОДНЕНИЯ НА РЕКЕ АБАКАН

Паромов Владимир Валериянович<sup>1</sup>,  
pvv0266@mail.ru

Шумилова Ксения Александровна<sup>1</sup>,  
avelissa@mail.ru

Гордеев Иван Николаевич<sup>2</sup>,  
biggin83@mail.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

<sup>2</sup> Гидрометеорологический центр Среднесибирского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды,  
Россия, 660049, г. Красноярск, ул. Сурикова, 28.

**Актуальность работы** обусловлена изменениями климата и увеличением повторяемости опасных гидрологических явлений на реках гор южной Сибири. Как следствие – рост величины социально-экономического ущерба.

**Цель работы:** анализ условий формирования весенних половодий высокой водности на реке Абакан, выявление гидроклиматических закономерностей как основы для прогноза вероятности формирования экстремально больших расходов воды, создание методики заблаговременного предупреждения опасных явлений.

**Методы исследования:** комплексный географо-гидрометеорологический анализ, выявление прогностических зависимостей по данным многолетних гидрометеорологических наблюдений с использованием методов математической статистики.

**Результаты.** Выявлены 4 типа волны весеннего половодья большой водности (обеспеченностью менее 33,3 %), различающиеся по степени опасности для человека, населенных пунктов и промышленных объектов на берегах р. Абакан. Основные факторы формирования волны половодья большой водности следующие: 1) повышенное количество зимних осадков – в среднем по водосбору сумма осадков с ноября по март более чем на 10 % выше нормы; 2) обильные, в основном жидкие, осадки апреля. Сумма осадков за апрель по метеостанциям-предикторам Неожиданный и Таштып соответственно – на 25 и 50 % выше нормы. Предложена методика прогноза наводнения, основанная на нахождении так называемого «коэффициента экстремальности половодья». Методика проверена на зависимом и независимом материалах, оценка по независимому материалу показала «удовлетворительный» результат. С помощью методики проверены экстремальные по водности года: 1969, 2004, 2014.

### Ключевые слова:

Наводнение, оценка опасности, методика прогноза, максимальные расходы, бассейн реки Абакан, прогноз экстремальности половодья.

### Введение

Механизм формирования режима речного стока и, в частности, весеннего половодья, использование полученных прогностических зависимостей в целях предотвращения неблагоприятных последствий опасных гидрологических явлений (ОГЯ) является важнейшим объектом научных исследований в области гидрометеорологии и обеспечения устойчивого развития регионов [1].

В настоящий момент многие страны столкнулись с воздействием изменений климата на водные ресурсы. Наблюдается учащение стихийных наводнений. Эта тенденция особенно видна в горных районах, на которых преобладают наводнения, вызванные весенним половодьем. На равнинных территориях также наблюдается учащение опасных гидрологических явлений, но их сроки, как правило, приходятся на летне-осенние паводки. Наша страна занимает огромную площадь с разными географическими условиями, поэтому подвержена разным типам наводнений [2–9].

На большей части рек России период половодья наступает ежегодно в весенний или весенне-лет-

ний сезоны и характеризуется интенсивным питанием в результате снеготаяния. Выпадающие в период половодья жидкие осадки могут вызывать дополнительные пики на подъеме и на спаде половодья. При этом формируются наибольшие в году расходы воды, достигающие экстремальных значений в особо многоводные годы и вызывающие катастрофические наводнения. Прогнозируемое направление изменения климата на территории России, наблюдаемое в данном регионе изменение объемов речного стока и неизбежный дальнейший рост хозяйственного освоения речных долин, несомненно, приведут к увеличению повторяемости и разрушительной силы наводнений [10–15].

Постоянство появления половодья в бассейне реки Абакан обуславливает надежность прогнозирования его появления, но не его мощности. Поскольку объем и продолжительность половодья и, главное, уровень затопления территорий зависят от большого числа факторов, из которых основными являются климатические.

Бассейн реки Абакан площадью 32 000 км<sup>2</sup> полностью располагается в пределах Республики

Хакасия, охватывая около 52 % ее территории, общая протяженность реки – 514 км. Истоки Абакана (по р. Большой Абакан) находятся в хребтах зоны сочленения Западного Саяна со структурами Горного Алтая (рис. 1). Высотные отметки водораздельных хребтов колеблются в пределах 2200–2800 м, истоки располагаются на высотах 2150–2400 м. В высокогорной части р. Большой Абакан после приема притоков Коэтру, Каирсу, Еринат и Кокажам имеет ширину до 50–70 м, скорость течения 1,2–2,3 м/с и значительный продольный уклон (до 0,05) [8]. Горный характер река имеет на протяжении 295 км. От истоков до выхода реки на равнину перепад высот составляет около 2000 м, средний продольный уклон – 0,007, средняя высота водосбора – около 1550 м. Площадь водосбора на этом участке – 14 400 км<sup>2</sup>. В горной части река, после слияния Большого и Малого Абакана, принимает крупные притоки: слева – река Матур, справа – реки Кизас, на, Джебаш, Малый и Большой Арбаты, а также многочисленные малые реки и ручьи. В равнинной части реки Абакан (площадь водосбора 17 600 км<sup>2</sup>) перепад высот русла составляет 180 м, продольный уклон уменьшается до 0,0013. На всем этом отрезке русло реки разбивается на ряд рукавов, проток. Ширина русловой части долины колеблется от 2 до 4 км, пойменной части с нижними террасами – до 6–7 км. Притоками слева здесь являются реки Таштып, Тея, Есь, Аскиз, База, Камышта, Уйбат, справа – Сос, Табат, Уты, Бея. На берегах р. Абакан расположены крупные населенные пункты, важные промышленные и транспортные центры Республики Хакасия – г. Абаза и столица республики г. Абакан [16].

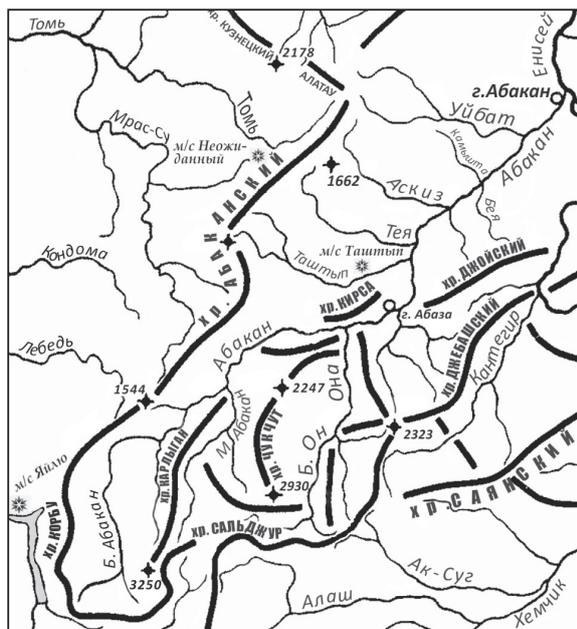


Рис. 1. Гидроорографическая схема бассейна реки Абакан  
Fig. 1. Hydro-oro-graphic scheme of the Abakan river Basin

Для режима стока рек характерны: весеннее половодье, летние паводки и низкая зимняя межень. Весной и летом проходит до 80 % годового стока реки, на зиму приходится от 5 до 10 %. Подъем уровней весной начинается в первой половине апреля, еще при ледоставе, и достигает максимума (3–5 м над среднемеженным уровнем в горной части бассейна, 2–3 м – в пределах равнинной его части) после очищения реки ото льда – в конце мая – начале июня. Половодье состоит из серии подъемов и понижений, обусловленных ходом таяния снега в соответствии с колебаниями температур воздуха. Среднегодовой расход воды р. Абакан в створе г. Абаза равен 315 м<sup>3</sup>/с, а в створе п. Райков (25 км выше по течению от г. Абакан) – 394 м<sup>3</sup>/с.

Резкая континентальность климата региона определяется его географическим положением в центре Азиатского материка. Вытянутость горной системы с юго-запада на северо-восток обеспечивает задержку арктических и атлантических влажных воздушных масс, что является причиной сильной циклонической активности на северном макросклоне Западного Саяна [17].

Зима устанавливается в конце октября – начале ноября, когда средняя суточная температура воздуха переходит через –5°. В этот период преобладают ветра западных направлений. Атмосферных осадков выпадает незначительное количество, особенно мало – в Абаканской степи (32–34 мм). В горном лесном поясе количество осадков за зиму увеличивается до 300 мм (28–30 % годовой суммы).

Распределение снежного покрова по территории неравномерное. Наименьшее количество снега выпадает в степной зоне, где максимальная высота снежного покрова составляет 23–29 см. Средняя высота его в Абаканской степи 13–15 см. Увеличение высоты снежного покрова происходит на подветренных склонах и в понижениях. Запасы воды в снеге увеличиваются от степной зоны (24–25 мм) к горной лесостепи (30–35 мм) и поясу горной тайги (более 280 мм).

Весной азиатский антициклон постепенно ослабевает, широтная циркуляция воздушных масс уменьшается, но усиливается меридиональная. В конце апреля средняя суточная температура воздуха переходит через +5°, а в горном лесном поясе – в третьей декаде мая. Продолжительность весеннего периода – 40–50 дней. Лето наступает в степных районах во второй – третьей декаде мая, а в горах – во второй декаде июня [18].

Наибольшее количество осадков выпадает летом, когда преобладает зональная циркуляция. В результате усиления циклонической деятельности в теплый период года в зоне степей осадков выпадает 85–95 % от годовой нормы. Выпадение осадков в основном связано с прохождением холодных воздушных масс и носит ливневый характер. Количество осадков за апрель–октябрь в Хакасии возрастает по мере увеличения высоты от степной зоны (250–350 мм) к горной лесостепи (350–450 мм) и к поясу горной тайги (450–650 мм) [17].

### Постановка задачи и исходные данные

Основными количественными показателями оценки мощности наводнения являются максимальный расход и уровень воды. Половодье считается экстремальным и переходит в разряд наводнения, если формируются максимальные расходы воды и, соответственно, образуются высокие уровни воды, при которых происходит затопление пониженных частей населенных пунктов, сельскохозяйственных угодий, автомобильных и железных дорог, повреждение промышленных объектов. По масштабу наводнений и наносимому ими ущербу выделяют четыре вида наводнений: низкие (малые), высокие (большие), выдающиеся и катастрофические [19–23].

Главными факторами, обуславливающими мощность весеннего половодья, являются: запас воды в снежном покрове перед началом снеготаяния; количество и интенсивность выпадения атмосферных осадков в период снеготаяния и первую фазу половодья; осенне-зимнее увлажнение почвы к началу снеготаяния, термические условия весны, влияющие на интенсивность снеготаяния [24].

В бассейне р. Абакан за период гидрологических инструментальных наблюдений зафиксированы наводнения, относящиеся к классу высоких и выдающихся, в 1941, 1966, 1969, 1973, 2004, 2006, 2010, 2014 гг. Существует вероятность увеличения частоты экстремальных гидрологических ситуаций в южной части Сибирского ФО и, в частности, в бассейне р. Абакан [25]. Наиболее опасными из перечисленных, по ряду признаков, относящихся к классу катастрофических, на данный момент времени, можно считать наводнения 1969 и 2014 гг.

Основной целью работы стало определение и анализ гидроклиматических условий формирования наводнений на р. Абакан, а также выработка методики долгосрочного прогноза водности (средний за май и июнь расход воды  $\bar{Q}_{v-vi}$ ) и степени опасности волны половодья, что представляет значительный интерес для потребителей водных ресурсов и является важной задачей, решение которой может помочь предотвратить экономический ущерб и человеческие жертвы.

В качестве базового, для анализа гидроклиматических условий формирования наводнений и методики прогноза, был выбран створ р. Абакан – г. Абаза. Основанием для этого явилось следующее: а) период наблюдений за стоком составляет 77 лет – с 1937 по 2013 гг.; б) 82 % объема половодья в створе р. Абакан – п. Райков формируется в горной части водосбора, т. е. по замыкающему створу г. Абаза; в) с учетом вышесказанного прогнозные значения расходов воды, полученные по створу г. Абаза, с хорошей точностью можно пересчитать для створа п. Райков и уровня воды для створа г. Абакан.

Большая водность половодья ( $\bar{Q}_{v-vi} \geq 980 \text{ м}^3/\text{с}$  в створе р. Абакан – г. Абаза, по данным многолетних гидрологических наблюдений) – это первый сигнал к формированию экстремально высоких

среднесуточных расходов воды и, соответственно, наводнения в черте населенных пунктов по берегам р. Абакан, от г. Абаза и далее, вниз по течению до г. Абакан. В качестве граничного (критического) среднесуточного расхода, превышение которого и переводит расходы в разряд экстремальных, принят расход  $2380 \text{ м}^3/\text{с}$ , соответствующий уровню 490 см – высотной отметке неблагоприятного гидрологического явления, при достижении которого начинается подтопление части г. Абаза и полотна ж/д Абаза – Абакан (по данным Среднесибирского УГМС).

При разработке методики прогноза показателей экстремальности половодья использовался формализованный подход – получение математической зависимости, которая позволяет вычислить будущее значение процесса. А именно, статистической модели множественной регрессии, когда зависимость будущего значения от прошлого задается в виде уравнения. Выбранный подход для прогноза гидрологических характеристик речного стока обладает рядом достоинств, так и определенными недостатками [26–28]. В данном случае такой выбор – следствие крайней ограниченности имеющейся гидрометеорологической информации с горной части водосбора р. Абакан.

Таким образом, для анализа гидроклиматических условий формирования наводнений и выработки методики прогноза был привлечен следующий комплекс гидрометеорологических данных:

1. Блок гидрологических данных: а) среднемесячные значения расходов воды за весь период наблюдений до 2013 г. в замыкающих створах: р. Абакан – г. Абаза, р. Абакан – п. Райков, р. Большой Абакан – п. Усть-Кизас, р. Малый Абакан – п. Усть-Тарташ, р. Таштып – п. Таштып, р. Она – п. Малый Анзас; б) ежедневные расходы воды за половодье (с апреля по июнь) по створам р. Абакан – г. Абаза, р. Абакан – п. Райков.
2. Блок метеорологических данных по 6 метеостанциям, расположенным как в бассейне р. Абакан (м/с Таштып), так и на западе – северо-запад от бассейна – в соответствии с направлением влагонесущих потоков (метеостанции Яйлю, Турочак, Кондома, Кузедеево, Неожиданный): а) суммы месячных атмосферных осадков и среднемесячных температур воздуха за весь период наблюдений до 2013 г.; б) среднесуточные температуры воздуха и ежедневные осадки за период половодья по метеостанциям Таштып и Неожиданный; в) максимальный запас воды в снеге по метеостанциям Неожиданный, Таштып, Яйлю, Турочак.

### Результаты

На первом этапе исследования проводился отбор гидроклиматических факторов, влияющих на формирование половодья большой водности с последующим проведением регрессионного анализа и получением прогностической модели множе-

ственной регрессии. Матрица коэффициентов парной корреляции включала 68 предикторов: а) среднемесячные расходы воды за октябрь и ноябрь, среднезимний расход в створах р. Абакан – п. Абаза и р. Таштып – п. Таштып; б) среднемесячные температуры воздуха за октябрь, март, апрель, май, а также среднесезонные температуры воздуха за периоды с ноября по февраль и с марта по апрель по 6 включенным в анализ метеостанциям; в) суммы атмосферных осадков за октябрь, март, апрель, май, а также за холодный (с ноября по февраль) и весенний (март и апрель) периоды по всем 6 метеостанциям; г) запас воды в снеге на 20 марта по метеостанциям Неожиданный, Таштып, Яйлю, Турочак.

Статистически значимыми предикторами водности весеннего половодья в створе г. Абаза оказались: среднемесячный расход воды за ноябрь предшествующего года  $P_1$  (м<sup>3</sup>/с); максимальный запас воды в снежном покрове на м/с Неожиданный  $P_2$  (мм); сумма атмосферных осадков апреля по м/с Таштып  $P_3$  (мм).

$$\bar{Q}_{V-VI} = 291,7 + 1,31P_1 + 1,54P_2 + 2,70P_3, \quad (1)$$

где  $\bar{Q}_{V-VI}$  – средний за май и июнь расход воды в первом приближении, найденный по данным за весь период наблюдений, без учета группы водности половодья.

По доли вклада в вариацию среднего за половодье расхода воды на первом месте находится фактор  $P_2$  – максимальный запас воды в снежном покрове на метеостанции Неожиданный, расположенной в Хакасии на наветренном склоне Абаканского хребта на север-северо-запад от г. Абаза (рис. 1).

Тесная связь запаса воды в снежном покрове с величиной половодья на р. Абакан не является случайной и в определенной мере отражает условия снегонакопления на наветренных склонах хребтов в верхней и средней частях бассейна р. Абакан в соответствии с направлением влагонесущих атмосферных потоков. На втором и третьем местах по доли вклада – осадки апреля по м/с Таштып ( $P_3$ ) и, соответственно, среднемесячный расход воды ноября предшествующего года ( $P_1$ ). Второе место фактора  $P_3$  говорит о том, что половодье на р. Абакан по происхождению является снегодождевым, когда на волну талой воды сезонного снежного покрова, сформировавшуюся в верхней и средней части водосбора, накладываются более мелкие паводочные волны жидких либо смешанных осадков, выпавших в нижней части водосборного бассейна. Статистически значимое значение предиктора  $P_1$  (табл. 1) – свидетельство того факта, что предзимнее увлажнение верхней толщи почвогрунтов является фоновым положительным фактором половодья большой водности. В качестве косвенного показателя предзимнего увлажнения выступает осенний сток. В данном случае расход воды ноября в створе г. Абаза, с одной стороны, зависит от влажности почвогрунтов, которая увели-

чивает коэффициент стока, а с другой – от размера грунтового питания, т. е. является интегральным показателем общего предзимнего увлажнения водосбора [24].

**Таблица 1.** Оценка статистической значимости и устойчивости модели множественной линейной регрессии

**Table 1.** Evaluation of statistical significance and stability of the multiple linear regression model

Параметры оценки Options of assessment	Коэффициенты уравнения Coefficients of the equation			
	Свободный член Free member	$P_1$	$P_2$	$P_3$
Модель множественной линейной регрессии (1) Multiple Linear Regression Model (1)				
Значение коэффициента Value of the coefficient	291,7	1,31	1,54	2,70
Стандартная ошибка коэффициента Standard coefficient error	103,9	0,51	0,30	0,93
$R^2$	0,521			
$\bar{S}/\sigma$	На зависимом материале On the dependent data	На независимом материале On the independent data		
	0,66	0,77		
Количество совместных лет наблюдений Number of years of joint observations	45			
Модель множественной линейной регрессии (2) Multiple Linear Regression Model (2)				
Параметры оценки Options of assessment	Свободный член Free member	$\bar{Q}_{V-VI}$	$P_4$	
Значение коэффициента Value of the coefficient	433,7	0,484	2,77	
Стандартная ошибка коэффициента Standard coefficient error	95,4	0,112	1,10	
$R^2$	0,817			
$\bar{S}/\sigma$	На зависимом материале On the dependent data	На независимом материале On the independent data		
	0,47	0,64		
Количество совместных лет наблюдений Number of years of joint observations	16			

Примечание:  $R^2$  – коэффициент детерминации;  $\bar{S}/\sigma$  – параметр оценки качества модели множественной линейной регрессии.

Note:  $R^2$  is the determination coefficient;  $\bar{S}/\sigma$  is the parameter of estimating the quality of Multiple Linear Regression Model.

Далее проводилось уточнение полученного по уравнению 1 значения  $\bar{Q}_{V-VI}$ . При этом рассматривались только годы с половодьем большой водности. Таким образом, факторы формирования половодий, наиболее опасных для населения и хозяйственных объектов, дополнялись и детализировали-

лись. Было выявлено, что ввод в расчет дополнительного предиктора – суммы осадков холодного периода года (с ноября по март) по м/с Таштып  $P_4$  (мм) – существенно улучшает оценку среднего расхода воды за половодье:

$$\bar{Q}_{V-VI} = 0,484\bar{Q}_{V-VI} + 2,77P_4 + 433,7, \quad (2)$$

где  $\bar{Q}_{V-VI}$  – расчетный средний за май и июнь расход воды во втором приближении.

Таким образом, сумма осадков холодного периода года, выпавших в нижней части водосбора, – это дополнительный фактор формирования волны половодья большой водности в створе г. Абаза.

*Второй этап* исследования – разработка методики прогноза формирования экстремальных суточных расходов воды, т. е. возможности наводнения в створе г. Абаза.

Анализ гидрографов стока за половодный период в годы их большой водности показал, что только в 75 % случаев формируются экстремально большие суточные расходы воды, что приводит к подтоплению городских территорий и хозяйственных объектов. В оставшихся 25 % случаев наблюдается растянутое во времени половодье с расходами, не превышающими критический порог (рис. 2, тип 1). В тех случаях, когда подтопление территорий начинается, пик половодья и, соответственно,

время прохождения экстремально больших среднесуточных расходов воды может быть как более ранним – начало 3-й декады мая, так и более поздним – 2-я декада июня (рис. 2, тип 2 и 3). Максимальные среднесуточные расходы воды таких волн половодья на 5–10 % больше критического для г. Абаза значения. Наиболее опасным и разрушительным для человека является половодье 4-го типа (2 случая за инструментальный период наблюдений), когда формируется экстремально высокая волна, с максимальными среднесуточными расходами более чем в 2 раза больше критического значения и пиком в последнюю пентаду мая – начале июня. Примером таких катастрофических наводнений является половодье 1969 и 2014 гг.

В качестве количественного показателя возможности наводнения был использован эмпирический коэффициент, названный нами «коэффициентом экстремальности половодья»  $K_{кЭП}$  (extremality flood factor  $K_{EFF}$ ). Это безразмерный показатель, отражающий мощность весенней волны половодья. При  $K_{кЭП} > 1$  на р. Абакан в створе г. Абаза начинается подтопление социально и хозяйственно важных объектов.

$$K_{кЭП} = \frac{Q_{\max}}{Q_{\text{крит}}} + \frac{W_3}{W_B}, \quad (3)$$

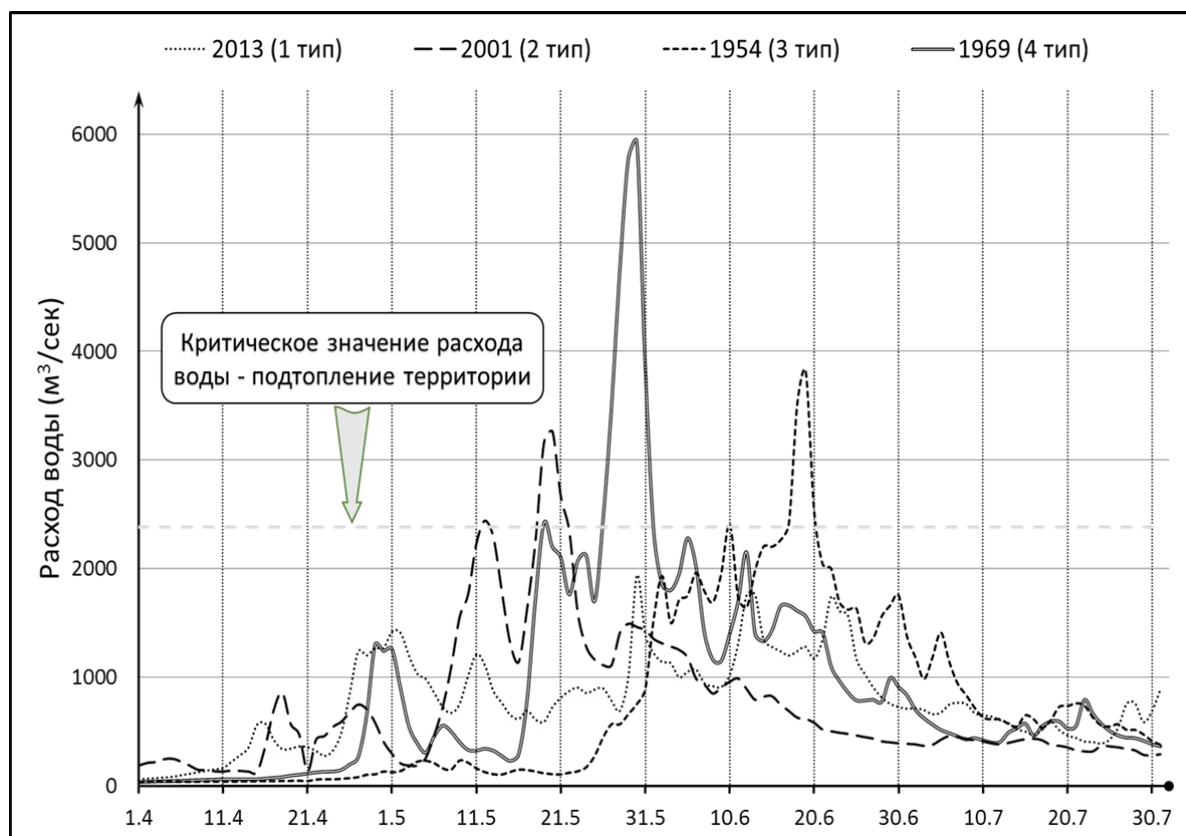


Рис. 2. Характерные типы гидрографов стока за половодный период на реке Абакан, створ г. Абаза

Fig. 2. Specific types of runoff hydrograph for the flood time on the Abakan river, the outlet of Abaza

где  $Q_{\max}$  – максимальный суточный расход за период с 1.05 по 30.06 ( $\text{м}^3/\text{с}$ );  $Q_{\text{крит}}$  – расход воды, при достижении которого можно говорить о начале наводнения, равный  $2380 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $W_{\text{э}}$  и  $W_{\text{б}}$  – соответственно «экстремальный» и «базовый» объемы волны половодья ( $\text{м}^3$ ) за период с 1.05 по 30.06, равные:

$$W_{\text{э}} = \bar{Q}_{\text{э}} \times N_{\text{э}} \times 86400;$$

$$W_{\text{б}} = \bar{Q}_{\text{б}} \times N_{\text{б}} \times 86400. \quad (4)$$

где  $\bar{Q}_{\text{э}}$  – средний расход за  $N_{\text{э}}$  дней, когда расходы были больше  $2380 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $\bar{Q}_{\text{б}}$  – средний расход за  $N_{\text{б}}$  дней, когда расходы были меньше или равны  $2380 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Выполненный корреляционно-регрессионный анализ позволил выявить гидрометеорологические факторы, влияющие на формирование экстремально высоких суточных расходов воды в створе г. Абаза, а также получить прогностическую регрессионную зависимость для  $K_{\text{кэп}}$  следующего вида:

$$K_{\text{кэп}} = 0,00306P_2 + 0,00438E_5 - 0,062P_6 - 0,926, \quad (5)$$

где  $P_5$  – сумма атмосферных осадков апреля по м/с Неожиданный;  $P_6$  – среднезимняя температура воздуха по м/с Таштып.

Оценка качества модели (5) на независимом материале показала «удовлетворительный» результат. Отношение стандартной ошибки уравнения регрессии к среднему квадратическому отклонению ряда-предиктанта равно 0,69 (при  $R^2=0,76$ ).

Основной фактор формирования экстремально высоких суточных расходов воды половодья – величина водозапаса в сезонном снежном покрове и количество осадков апреля в средне- и высокогорной зоне водосбора. Фактором, благоприятствующим формированию таких расходов воды, являются низкие температуры воздуха зимнего сезона, приводящие к минимизации потерь сезонного снежного покрова (оттепели) в нижней части водосбора.

*Гидрометеорологическая обстановка весны 2014 г.* 30 мая 2014 г. на р. Абакан в створе г. Абаза был зафиксирован уровень воды, равный 673 см, что на 34 см превышает максимальный уровень, зафиксированный в 1969 г. Максимальный среднесуточный расход воды –  $6620 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $5930 \text{ м}^3/\text{с}$  в 1969 г.). Значение коэффициента экстремальности половодья – 3,59 (2,94 в 1969 г.) – абсолютный максимум за 78 лет инструментальных гидрологических наблюдений за стоком.

Проверка регрессионной модели (5), по данным 2014 г., показала, что главные факторы, приведшие к наводнению в этом году, абсолютно иные, лишь частично связанные с величиной снеготалопа в сезонном снежном покрове (табл. 2). Рассчитанный по климатическим данным 2014 г. коэффициент экстремальности оказался равным 0,44.

Половодье в Хакасии весной 2014 г. началось раньше из-за малоснежной и аномально теплой зимы. Положительная аномалия средней месячной

температуры воздуха ноября варьировала в пределах 4,7–6,6 °С. Превышение средней месячной температуры отмечалось в большинстве зимних месяцев. Средняя месячная температура марта превысила многолетние значения на 3,8–5,8 °С. В Абакане зарегистрированы температурные рекорды: абсолютные суточные максимумы температуры воздуха перекрыты 19 марта на 2,2 °С, 20 марта на 3,6 °С [8]. Запас воды в снеге в бассейне р. Абакан в предгорной части составил 40–70 % от нормы, в горной части 95–100 % [29]. То есть сформировалась и наблюдалась волна половодья по 1 типу (рис. 2).

**Таблица 2.** Климатические показатели – факторы формирования  $K_{\text{кэп}}$  на р. Абакан в створе г. Абаза

**Table 2.** Climatic indicators – the factors of  $K_{\text{eff}}$  formation on the river Abakan in the alignment of Abaza

Климатический фактор Climatic factor	Годы экстремально высоких расходов воды половодья Years of extremely high water flow of floods		
	1969	2004	2014
Водозапас в сезонном снежном покрове $P_2$ (мм) Water content in the seasonal snowpack $P_2$ (mm)	464	237	197
Сумма осадков апреля $P_5$ (мм) Amount of precipitation in April $P_5$ (mm)	127	185	47,5
Среднезимняя температура воздуха $P_6$ (°С) Average winter temperature $P_6$ (°C)	-22,7	-13,8	-8,9

Но начавшиеся в последнюю пентаду мая на территории Горного Алтая и Западного Саяна ливневые дожди, связанные с редкой синоптической ситуацией [30], и пришедшие на спад второй волны половодья талых снеговых вод с верхней части водосбора, привели к формированию экстремально высокого дождевого паводка и наводнения со среднесуточными расходами, в течении 5 дней превышавшими критический.

Коэффициент экстремальности половодья, оцененный по модели (5), равный 0,44 (рис. 3), отражает уровень опасности волны половодья талых снеговых вод с расходами не более  $1048 \text{ м}^3/\text{с}$ . Фактически измеренные среднесуточные максимумы расходов воды в период, предшествующий паводку, составили  $943 \text{ м}^3/\text{с}$ . Таким образом, прогностическая модель (5) достаточно точно отражает условия формирования «классического» весеннего половодья, где главную роль играют талые снеговые воды, и не подходит для прогноза экстремальных расходов дождевых паводков. Стоит отметить, что с 1937 г., начала регулярных гидрометрических наблюдений, это первый случай, когда объем и максимальные расходы паводка в несколько раз превысили объем и расходы половодья талых вод от сезонного снежного покрова [31, 32].

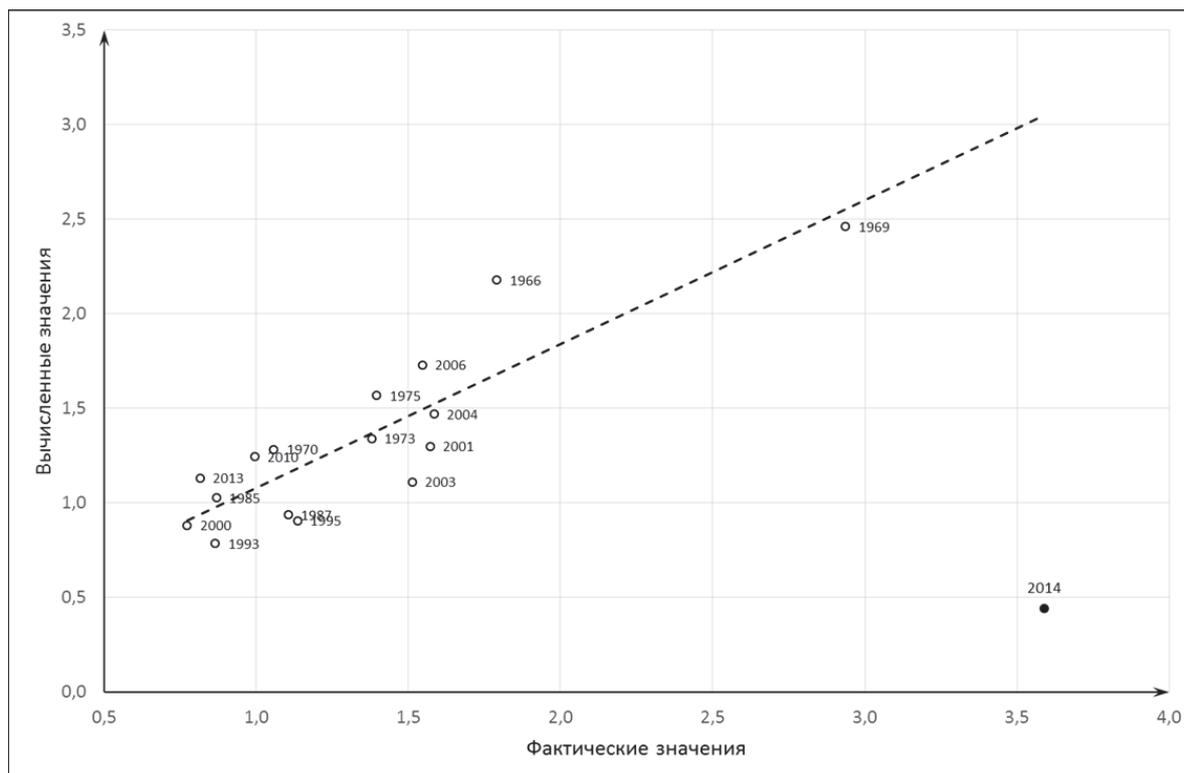


Рис. 3. Соотношение фактических и вычисленных значений  $K_{\text{CEP}}$  за годы с половодьем большой водности

Fig. 3. Ratio of actual and calculated values of  $K_{\text{CEP}}$  over the years with a great flood of water content

### Выводы

Основными климатическими факторами, влияющими на объем волны весеннего половодья и формирование экстремально высоких среднесуточных расходов воды на р. Абакан – створ г. Абаза являются: 1) сумма осадков зимнего сезона и максимальный запас воды в снежном покрове; 2) осадки апреля; 3) температура зимнего сезона; 4) предзимнее увлажнение верхней толщи почвогрунтов. При этом только в 75 % случаев прохождение волны половодья большой водности сопровождается формированием экстремально высоких расходов воды. В оставшихся 25 % случаев наблюдается растянутое во времени половодье с расходами, не превышающими критический порог. Всего выявлено 4 типа волны весеннего половодья большой водности (обеспеченностью менее 33,3 %), отличающиеся по степени опасности для человека, населенных пунктов и промышленных объектов на берегах р. Абакан.

Разработана методика долгосрочного прогноза среднего за май и июнь расхода воды – показателя водности весеннего половодья, и показателя мощности волны весеннего половодья – «коэффициента экстремальности половодья». При  $K_{\text{CEP}} > 1$  на р. Абакан в створе г. Абаза начинается подтопление социально и хозяйственно важных объектов. Данный эмпирический безразмерный параметр, по сути, является интегральным гидрологическим количественным показателем опасности наводне-

ния и может служить основой для разработки качественно новой классификации наводнений.

Основными предикторами прогностических уравнений множественной регрессии (2, 3, 5) являются отдельные климатические характеристики м/с Неожиданный и Таштып Хакасского ЦГМС. Оценка статистической значимости и устойчивости предложенных моделей показала их «удовлетворительное» качество и возможность использования в практике инженерно-гидрологических прогнозов. При этом основными направлениями улучшения предложенной методики являются замена выявленных предикторов на более качественные, например открытие метеостанций в бассейнах рек Большой и Малый Абакан, а также ежегодная верификация предлагаемых уравнений, связанная с удлинением рядов-предиктантов и, соответственно, уточнением коэффициентов.

Недостатком предложенной методики является невозможность статистически удовлетворительного долгосрочного прогноза параметров волны половодья смешанного происхождения, когда максимальные расходы и объем дождевого паводка в несколько раз превышают максимальные расходы и объем талых вод сезонного снежного покрова. Удовлетворительный результат прогноза будет достигнут, если предлагаемую методику дополнить прогнозом повторения синоптической ситуации, аналога весны 2014 г.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hydrological risks in Western Siberia under the changing climate and anthropogenic influences conditions / V.A. Zemtsov, V.V. Paromov, S.G. Kopysov, A.V. Kouraev, S.V. Negrul // *The international journal of environmental studies*. Iss. 5: Western Siberia in a changing climate. – 2014. – V. 71. – P. 611–617.
2. Basilashvili T., Tabatadze J., Janelidze M. Prevention of High Water floods of the Mountainous Rivers // *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. – 2011. – V. 19. – P. 580–585.
3. Catastrophic impact of extreme flood events on the morphology and evolution of the lower Jökulsá á Fjöllum (northeast Iceland) during the Holocene / E.R.C. Baynes, M. Attal, A.J. Dugmore, L.A. Kirstein, K.A. Whaler // *Geomorphology*. – 1 December 2015. – V. 250. – P. 422–436.
4. Primea Th., Brown J.M., Platera A.J. Flood inundation uncertainty: the case of a 0.5 % annual probability flood event // *Environmental Science & Policy*. – May 2016. – V. 59. – P. 1–9.
5. Flash flood hazard mapping: a pilot case study in Xiapu River Basin, China / Da-wei Zhang, Jin Quan, Hong-bin Zhang, Fan Wang, Hong Wang, Xiao-yan He // *Water Science and Engineering* – July 2015. – V. 8. – Iss. 3. – P. 195–204.
6. Taye M.T., Willems P., Block P. Implications of climate change on hydrological extremes in the Blue Nile basin: a review // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. – September 2015. – V. 4. – P. B. – P. 280–293.
7. Modrick Th.M., Georgakakos K.P. The character and causes of flash flood occurrence changes in mountainous small basins of Southern California under projected climatic change // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. – March 2015. – V. 3. – P. 312–336.
8. Impacts of Climate Changes on Water Resources in Yellow River Basin, China / Yongnan Zhu, Zhaohui Lin, Jianhua Wang, Yong Zhao, Fan He // *Procedia Engineering*. – 2016. – V. 154. – P. 687–695.
9. Borsch S., Simonov Y. Operational Hydrologic Forecast System in Russia // *Flood Forecasting. A Global Perspective* / Eds. Th.E. Adams, Th. Pagano. – Elsevier, 2016. – Ch. 7. – P. 169–181.
10. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1. Изменение климата / Г.В. Груза, А.С. Зайцев, И.Л. Кароль и др. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2008. – 228 с.
11. Современные глобальные и региональные изменения окружающей среды и климата / Ю.П. Переведенцев, М.А. Верещагин, К.М. Шанталинский, Э.П. Наумов, В.Д. Тудрий. – Казань: «УНИПРЕСС», 1999. – 96 с.
12. Изменение климата и его воздействие на экосистемы, население и хозяйство российской части Алтае-Саянского экорегиона: оценочный доклад / под ред. А.О. Кокорина. – М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF России), 2011. – 168 с.
13. Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И. Катастрофические наводнения XXI века: уроки и выводы. – М.: ООО «Дэкс-Пресс», 2003. – 352 с.
14. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections / A.I. Shiklomanov, R.B. Lammers, D.P. Lettenmaier, Yu.M. Polischuk, O.G. Savichev, L.C. Smith, A.V. Chernokulsky // *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences* / Eds. P.Ya. Groisman, G.Gutman. – Dordrecht, Springer Environmental Science and Engineering, 2013. – P. 111–154.
15. Extreme hydrological events: new concepts for security. Report of Workshop in the Russia. – Novosibirsk, 11–15 July. 2005. – Netherlands: Springer, 2005. – 183 p.
16. Государственный доклад. О состоянии окружающей среды Республики Хакасия в 2014 г. – Абакан / Департамент по охране окружающей среды Министерства промышленности и природных ресурсов Республики Хакасия. – Абакан, 2015. – 201 с.
17. Севастьянов В.В. Климат высокогорных районов Алтая и Саян. – Томск: Изд-во ТГУ, 1998. – 201 с.
18. Шауло Д.Н. Флора Западного Саяна // *Turczaninowia*. – 2006. – Т. 9. – Вып. 1–2. – 336 с.
19. Природные опасности России. Гидрометеорологические опасности / под ред. Г.С. Голицына, А.А. Васильева. – М.: «КРУК», 2002. – Т. 5. – 348 с.
20. Тенденция роста катастрофических наводнений на территории Российской Федерации / Г.М. Нигметов, Ю.А. Филатов, В.И. Пчелкин и др. // *Технология гражданской безопасности: науч.-техн. журнал ФЦ ВНИИ ГОЧС*. – 2003. – № 1–2. – С. 37–44.
21. Зонирование территории Российской Федерации по величине риска от наводнений / Г.М. Нигметов, В.И. Ларионов, Ю.А. Филатов и др. // *Технология гражданской безопасности: науч.-техн. журнал ФЦ ВНИИ ГОЧС*. – 2003. – № 1–2. – С. 30–35.
22. Бузин В.А. Опасные гидрологические явления. – СПб.: РГГМУ, 2008. – 228 с.
23. Фалеев М.И., Черных Г.С., Старостин А.С. Оценка опасностей и угроз, обусловленных катастрофическими наводнениями, и предложения по защите населения и территорий от них // *Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования*. – 2014. – Т. 4. – Вып. 2. – С. 18–32.
24. Владимиров А.М. Факторы, определяющие возникновение экстремальных расходов и уровней воды половодья // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического ун-та*. – 2009. – № 9. – С. 22–39.
25. Бузин В.А., Копалиани З.Д. Наводнения на реках России при современных тенденциях в изменении климата // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического ун-та*. – 2007. – № 5. – С. 43–54.
26. Савичев О.Г. Методика расчета максимальных расходов речных вод в таёжной зоне Западной Сибири // *Известия ТПУ*. – 2011. – Т. 318. – № 1. – С. 140–144.
27. Красногорская Н.Н., Нафикова Э.В., Ферапонтов Ю.И. Оценка и прогнозирование экстремальных гидрологических ситуаций // *Современные проблемы науки и образования*. – 2012. – Вып. 1. – С. 1–9.
28. Lawrence D., Haddeland I. Uncertainty in hydrological modeling of climate change impacts in four Norwegian catchments // *Hydrology Research*. – 2011. – № 42 (6). – P. 457–471.
29. Метельская Я. Как погодная аномалия повлияет на весеннее половодье в Хакасии // *Шанс. On-line еженедельник Хакасии*. URL: [http://www.shans-online.com/articles/2014-03-09/kak\\_pogodnaya\\_anomaliya\\_povliyaet\\_na\\_vesennee\\_polovode\\_v\\_hakasii/](http://www.shans-online.com/articles/2014-03-09/kak_pogodnaya_anomaliya_povliyaet_na_vesennee_polovode_v_hakasii/) (дата обращения: 09.03.2016).
30. Кононова Н.К. Связь стихийных бедствий в России в 2013 и 2014 гг. с циркуляцией атмосферы Северного полушария // *Сложные системы*. – 2014. – № 4 (13). – С. 46–60.
31. Silvestro F., Rebori N. Impact of precipitation forecast uncertainties and initial soil moisture conditions on a probabilistic flood forecasting chain // *Journal of Hydrology*. – November 2014. – V. 519 – P. A. – P. 1052–1067.
32. Meteorological and hydrological analysis of major floods in NE Iberian Peninsula / D. Pino, J.L. Ruiz-Bellet, J.C. Balasch, L. Romero-León, J. Tuset, M. Barriendos, J. Mazon, X. Castelltort // *Journal of Hydrology*. – 11 February 2016. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169416300336> (дата обращения: 02.06.2016).

Поступила 25.07.2016 г.

**Информация об авторах**

**Паромов В.В.**, кандидат географических наук, доцент кафедры гидрологии Национального исследовательского Томского государственного университета.

**Шумилова К.А.**, аспирант кафедры гидрологии Национального исследовательского Томского государственного университета.

**Гордеев И.Н.**, заместитель начальника Гидрометеорологического центра Среднесибирского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

UDC 556.166:556.16.06

## CONDITIONS OF FORMATION OF HIGH-WATER FLOOD AND FLOOD FORECAST ON THE RIVER ABAKAN

**Vladimir V. Paromov**<sup>1</sup>,  
pvv0266@mail.ru

**Kseniya A. Shumilova**<sup>1</sup>,  
avelissa@mail.ru

**Ivan N. Gordeev**<sup>2</sup>,  
biggin83@mail.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk State University,  
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>2</sup> Central Siberian Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring,  
28, Surikov Street, Krasnoyarsk, 660049, Russia.

**The relevance of the work** is caused by climate change and increase in frequency of occurrence of dangerous hydrological phenomena on the rivers of the southern Siberian mountains. As a consequence the social and economic damage grows.

**The aim** of the research is to analyze the conditions of formation of spring flood high water content on the river Abakan, to identify hydro-climatic laws as a basis for predicting the probability of formation of extremely high flow rates.

**Methods:** complex geographical and hydrometeorological analysis, identification of prognostic data dependencies of long-term meteorological observations using the methods of mathematical statistics.

**Results.** The authors have revealed four types of the tide of spring flood high water content (probability is less than 33,3 %), which differ in the degree of danger to human settlements and industrial facilities on the banks of river Abakan. The main factors of the formation of the flood high water content tide are the following: 1) increased amount of winter precipitation – at average the sum of rainfall catchment from November to March is 10 % above the norm; 2) abundant, mainly liquid, April precipitation. The amount of precipitation in April, according to the data of weather stations Neozhidanny and Tashtyp, is above normal by 25 and 50 %, respectively. The authors proposed the technique of flood prediction based on searching for the so-called «Extremality flood factor».

### Key words:

Flood, risk assessment, prediction technique, maximum water flow, Abakan River Basin, predictions of extreme floods.

### REFERENCES

1. Zemtsov V.A., Paromov V.V., Kopysov S.G., Kouraev A.V., Negrul S.V. Hydrological risks in Western Siberia under the changing climate and anthropogenic influences conditions. *The international journal of environmental studies. Iss. 5: Western Siberia in a changing climate*, 2014, vol. 71 (5), pp. 611–617.
2. Basilashvili T., Tabatadze J., Janelidze M., Prevention of High Water floods of the Mountainous Rivers. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 2011, vol. 19, pp. 580–585.
3. Baynes E.R.C., Attal M., Dugmore A.J., Kirstein L.A., Whaler K.A. Catastrophic impact of extreme flood events on the morphology and evolution of the lower Jökulsá á Fjöllum (northeast Iceland) during the Holocene. *Geomorphology*, 1 December 2015, vol. 250, pp. 422–436.
4. Primea Th., Brown J.M., Platera A.J. Flood inundation uncertainty: the case of a 0,5 % annual probability flood event. *Environmental Science & Policy*, May 2016, vol. 59, pp. 1–9.
5. Da-wei Zhang, Jin Quan, Hong-bin Zhang, Fan Wang, Hong Wang, Xiao-yan He. Flash flood hazard mapping: A pilot case study in Xiapu River Basin, China. *Water Science and Engineering*, July 2015, vol. 8, Iss. 3, pp. 195–204.
6. Taye M.T., Willems P., Block P. Implications of climate change on hydrological extremes in the Blue Nile basin: a review. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, September 2015, vol. 4, P. B, pp. 280–293.
7. Modrick Th.M., Georgakakos K.P. The character and causes of flash flood occurrence changes in mountainous small basins of Southern California under projected climatic change. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, March 2015, vol. 3, pp. 312–336.
8. Yongnan Zhu, Zhaohui Lin, Jianhua Wang, Yong Zhao, Fan He. Impacts of Climate Changes on Water Resources in Yellow River Basin, China. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 154, pp. 687–695.
9. Borsch S., Simonov Y. Ch. 7. Operational Hydrologic Forecast System in Russia. *Flood Forecasting. A Global Perspective*. Eds. Th.E. Adams, Th. Pagano. Elsevier, 2016. pp. 169–181.
10. Gruzova G.V., Zaytseva A.S., Korol I.L. *Otsenochny doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. Izmeneniya klimata* [Assessment report on climate change and their consequences in the Russian Federation]. Obninsk, VNIIGMI-MTSD Publ., 2008. Vol. 1, 228 p.
11. Perevedentsev Yu.P., Vereshchagin M.A., Shantalinskiy K.M., Naumov E.P., Tudriy V.D. *Sovremennyye globalnye i regionalnye izmeneniya okruzhayushchei sredy i klimata* [Current global and regional environmental change and climate]. Kazan, UNIPRESS Publ., 1999. 96 p.
12. *Izmenenie klimata i ego vozdeystvie na ekosistemy, naselenie i khozyaystvo rossiyskoy chasti Altae-Sayanskogo ekoregiona: otsenochny doklad* [Climate change and its impact on ecosystems, population and economy of the Russian part of the Altai-Sayan Ecoregion: assesment report]. Ed. by A.O. Kokorin. Moscow, Vsemirny fond dikoy prirody (WWF Rossii) Publ., 2011. 168 p.
13. Vorobev Yu.L., Akimov V.A., Sokolov Yu.I. *Katastroficheskie novodneniya XXI veka: uroki i vyvody* [The catastrophic floods of the XXI century: Lessons and Conclusions]. Moscow, Deks-press Publ., 2003. 352 p.
14. Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Lettenmaier D.P., Polischuk Yu.M., Savichev O.G., Smith L.C., Chernokulsky A.V. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Sta-

- tus, and Future Projections. *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*. Eds P.Ya. Groisman, G. Gutman. Dordrecht, Springer Environmental Science and Engineering, 2013. pp. 111–154.
15. *Extreme hydrological events: new concepts for security. Report of Workshop in the Russia*. Novosibirsk, 11–15 July, 2005. Netherlands, Springer, 2005. 183 p.
  16. *Gosudarstvenny doklad. O sostoyanii okruzhayushchey sredy Respubliki Khakassiya v 2014 g. Abakan* [State report. State of the Environment of the Republic of Khakassia in 2014. Abakan]. Abakan, Environmental Protection Department of the Ministry of Industry and Natural Resources of the Republic of Khakassia, 2015. 201 p.
  17. Sevastyanov V.V. *Klimat vysokogornyykh rayonov Altaya i Sayan* [Climate mountainous regions of Altai and Sayan]. Tomsk, TSU Press, 1998. 201 p.
  18. Shaulo D.N. Flora Zapadnogo Sayana [Flora of West Sayan]. *Turczaninowia*, 2006, vol. 9, Iss. 1–2, pp. 5–336.
  19. Prirodnye opasnosti Rossii. *Gidrometeorologicheskie opasnosti* [Natural hazards in Russia. Hydrometeorological hazards]. Ed. by G.V. Golitsyn, A.A. Vasilev. Moscow, KRUK Publ., 2002. Vol. 5, 348 p.
  20. Nigmatov G.M., Filatov Yu.A., Pchelkin V.I. Tendentsiya rosta katastroficheskikh novodneniy na territorii Rossiyskoy Federatsii [Trend of growth of catastrophic floods on the territory of the Russian Federation]. *Tekhnologiya grazhdanskoy bezopasnosti: nauchno-tekhnicheskyy zhurnal FTs VNII GOChS*, 2003, no. 1–2, pp. 37–44.
  21. Nigmatov G.M., Larionov V.I., Filatov Yu.A. Zonirovanie territorii Rossiyskoy Federatsii po velichine riska ot novodneniy [Zoning of the territory of the Russian Federation by the magnitude of risk from floods]. *Tekhnologiya grazhdanskoy bezopasnosti: nauchno-tekhnicheskyy zhurnal FTs VNII GOChS*, 2003, no. 1–2, pp. 30–35.
  22. Buzin V.A. *Opasnye gidrologicheskie yavleniya* [Dangerous hydrological phenomena]. St-Petersburg, RGGMU Publ., 2008. 228 p.
  23. Faleev M.I., Chernykh G.S., Starostin A.S. Otsenka opasnostey i ugroz, obuslovlennykh katastroficheskimi navodneniyami, i predlozheniya po zashchite naseleniya i territoriy ot nikh [Evaluation of dangers and threats posed by catastrophic floods, and proposals to protect the population and territories from them]. *Strategiya grazhdanskoy zashchity: problem i issledovaniya*, 2014, vol. 4, Iss. 2, pp. 18–32.
  24. Vladimirov A.M. Faktory, opredelyayushchie vozniknovenie ekstremalnykh raskhodov i urovney vody polovodya [Factors determining the occurrence of extreme water levels and costs of flood]. *Uchen. zap. Ros. gos. gidrometeorol. un-ta*, 2009, no. 9, pp. 22–39.
  25. Buzin V.A., Kopaliani Z.D. Novodneniya na rekakh Rossii pri sovremennykh tendentsiyakh v izmenenii klimata [Floods on the rivers of Russia at current trends of climate change]. *Uchen. zap. Ros. gos. gidrometeorol. un-ta*, 2007, no. 5, pp. 43–54.
  26. Savichev O.G. Methods of calculating the maximum river water costs in the taiga zone of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 1, pp. 140–144. In Rus.
  27. Krasnogorskaya N.N., Nafikova E.V., Ferapontov Yu.I. Otsenka i prognozirovanie ekstremalnykh gidrologicheskikh situatsiy [Estimation and forecasting of extreme hydrological situations]. *Sovremennyye problem nauki i obrazovaniya*, 2012, Iss. 1, pp. 1–9.
  28. Lawrence D., Haddeland I. Uncertainty in hydrological modeling of climate change impacts in four Norwegian catchments. *Hydrology Research*, 2011, no. 42 (6), pp. 457–471.
  29. Metelskaya Ya. Kak pogodnaya anomalija povliyaet na vesennee polovode v Khakassii [In what way will the weather influence spring flood in Khakassia]. *Shans. On-line ezhenedelnik Khakassii*. Available at: [http://shans-online.com/articles/2014-03-09/kak\\_pogodnaya\\_anomalija\\_povliyaet\\_na\\_vesennee\\_polovode\\_v\\_hakassii/](http://shans-online.com/articles/2014-03-09/kak_pogodnaya_anomalija_povliyaet_na_vesennee_polovode_v_hakassii/) (accessed 9 March 2016).
  30. Kononova N.K. Svyaz stikhiynykh bedstviy v Rossii v 2013 i 2014 gg. s tsirkulyatsiyey atmosfery Severnogo polushariya [Relation of disasters in Russia in 2013 and 2014. with the atmospheric circulation in the Northern Hemisphere]. *Slozhnye sistemy*, 2014, no. 4 (13), pp. 46–60.
  31. Silvestro F., Rebora N. Impact of precipitation forecast uncertainties and initial soil moisture conditions on a probabilistic flood forecasting chain. *Journal of Hydrology*, November 2014, vol. 519, P. A, pp. 1052–1067.
  32. Pino D., Ruiz-Bellet J.L., Balasch J.C., Romero-León L., Tuset J., Barriendos M., Mazon J., Castellort X. Meteorological and hydrological analysis of major floods in NE Iberian Peninsula. *Journal of Hydrology*, 11 February 2016. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169416300336> (accessed 02 June 2016).

Received: 25 July 2016.

#### Information about the authors

**Vladimir V. Paromov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk State University.

**Kseniya A. Shumilova**, graduate student, National Research Tomsk State University.

**Ivan N. Gordeev**, Deputy Chief, Hydrometeorological Center, Central Siberian Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring.

УДК 669.1.017:620.18:620.19

## ОСОБЕННОСТИ МИКРОСТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ КОТЕЛЬНЫХ ТРУБ ИЗ СТАЛИ 20 В СОСТОЯНИИ ЗАВОДСКОЙ ПОСТАВКИ

Помазова Анна Викторовна<sup>1</sup>,

pomazova@yandex.ru

Артамонцев Александр Иванович<sup>2</sup>,

a\_art@tpu.ru

Заворин Александр Сергеевич<sup>2</sup>,

zavorin@tpu.ru

<sup>1</sup> ЗАО НДЦ НПФ «Русская лаборатория»,  
Россия, 644035, г. Омск, пр. Губкина, 7/8.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью минимизации коррозионных потерь металла трубных поверхностей нагрева при их эксплуатации. Это в значительной мере влияет на остроту проблемы обеспечения надежности функционирования котельных агрегатов тепловых электрических станций и объектов промышленной теплоэнергетики. В свою очередь, увеличение надежности и безаварийности работы тепломеханического энергооборудования, наряду с повышением безопасности жизни и снижением рисков потенциального вреда обслуживающему персоналу и окружающей среде, непосредственно связано с энергоэффективным использованием ресурсов. Важный аспект актуальности работы состоит в том, что объектом исследования являются трубы из углеродистой стали (марка стали 20), которая относится к наиболее используемым в российском энергомашиностроении для изготовления поверхностей нагрева паровых котлов.

**Цель работы.** Анализ микрорельефа наружной и внутренней поверхности новых труб типоразмера 60×6,0 мм, изготовленных из стали 20; изучение по толщине стенки структурной неоднородности и размерных параметров микроструктуры для прогнозных заключений о надежности и преобладающих механизмах повреждаемости, которые будут развиваться в процессе эксплуатации; анализ проведения возможных дополнительных мероприятий, улучшающих эксплуатационные свойства и ресурс труб поверхностей нагрева.

**Методы исследования:** металлографические методы исследования структурных составляющих стали, методы измерения микротвердости.

**Результаты.** На поверхностях труб в состоянии поставки обнаружены различные типы дефектов (раскатанная корочка, межкристаллитные трещины, технологические дефекты в виде канавок с закругленным дном), которые неравномерно распределены по поверхности трубы. Глубина дефектов достигает половины браковочного уровня для эксплуатируемых труб. По толщине стенки трубы зафиксирована структурная неоднородность и перепад размерных параметров микроструктуры. Наличие указанных дефектов и неоднородность материала трубы приводят к существенным изменениям скорости развития повреждения и снижают ресурс котельных труб. Предложены запатентованные способы, направленные на улучшение свойств поверхности и снижение структурной неоднородности труб. Приведенные способы (режим паровоздушной обработки труб, режим двукратной нормализации при 920 °С) доступны для осуществления в условиях теплогенерирующих компаний и эффективно снижают скорость коррозионных процессов.

### Ключевые слова:

Сталь 20, трубы поверхностей нагрева, структурная неоднородность, дефекты поверхности, ресурс котельных труб.

### Введение

Готовность всех систем тепловых электрических станций к длительной непрерывной выработке тепловой и электрической энергии в значительной мере зависит от надежности котельного оборудования, большинство отказов которого происходит из-за повреждений труб поверхностей нагрева [1]. Статистический анализ лаборатории разрушающего контроля в г. Омске свидетельствует, что около 80 % аварийных остановов котлов связано с повреждениями теплообменных труб, большая часть которых произошла из-за развития процессов коррозии на наружной поверхности. Установлено, что дефекты, являющиеся причинами повреждения, могут возникать не только в процессе эксплуатации, но и на стадии изготовления и монтажа поверхностей нагрева. Технические условия

[2] регламентируют возможность их механического удаления при условии, что толщина стенки в месте удаления дефекта не выйдет за минимальные допустимые значения. При этом, согласно [2], допускается оставлять на поверхностях труб дефекты глубиной не более 5 % от номинальной толщины стенки трубы.

Как известно, трубы для поверхностей нагрева котлов в процессе изготовления проходят длинную и сложную технологическую цепь термомеханических операций. Под влиянием неконтролируемых отклонений в любой из операций структура стенки трубы приобретает те или иные индивидуальные особенности дефектности, заключающиеся в появлении наклепа, слоистости, внутренних остаточных напряжений и разнородности [3, 4]. Так, было показано [3], что трубная сталь в состоя-

нии поставки обладает существенной неоднородностью внутренних напряжений, что может приводить к разрушению металла в областях локальных концентраций напряжений при внешней термической или механической нагрузке. В работах [4, 5] было показано, что две соседние трубы, изготовленные из углеродистой стали, могут иметь значительно различающуюся микроструктуру и, как следствие, разную коррозионную стойкость в идентичных условиях эксплуатации. В ферритных нержавеющих сталях микроструктура так же оказывает значительное влияние на коррозионную стойкость в агрессивных средах и режимами термической обработки можно менять эксплуатационные свойства [6, 7]. Основными причинами различающейся феррито-перлитной микроструктуры в котельной стали 20, получаемой в промышленных объемах, являются неравновесные условия кристаллизации металла, присутствие в его составе легирующих и примесных элементов, деформация кристаллической решетки вследствие воздействия на нее механических, термических и других факторов в процессе изготовления изделий [8]. Эти же причины влияют и на микрорельеф поверхности, а наличие дефектов поверхности трубы, даже не выходящих за нормы требований ТУ 14-ЗР-55-2001 [2], снижает эксплуатационную надежность котельных элементов [9, 10]. В частности, от качества поверхности зависит сопротивление тепловоспринимающей трубы зарождению трещин при термоциклировании, развитие коррозионных процессов [11]. В работе [12] показано, что тип и геометрия трещин в трубах, их месторасположение и условия нагружения при эксплуатации определяют различный уровень трещиностойкости. Оценка сопротивления развитию повреждения через толщину стенки труб из аустенитной стали от вершины трещины, присутствующей на поверхности, показала различающийся уровень предельной нагрузки, приводящей к разрушению, что также связано с видом концентратора [13].

Металловедческие данные, приведенные в работе [14], показывают, что оксидный слой на поверхности неоднороден даже у новых труб и интенсивная коррозия и другие повреждающие процессы чаще всего возникают на основе дефектов как поверхности, так и структуры. Таким образом, анализ структуры и рельефа поверхностей котельных труб в состоянии поставки позволяет получить полезную информацию для прогнозных заключений о надежности и преобладающих механизмах повреждаемости, которые будут развиваться в процессе эксплуатации.

Ввиду установленного наличия указанных факторов в технологии производства труб целью данной работы является изучение неоднородности материала, проявляющейся в характеристиках микроструктуры и микротвердости по толщине стенки труб, не подвергавшихся эксплуатационным воздействиям.

## Материалы и методы

Исследование проведено на образцах труб из стали 20, как наиболее распространенной для изготовления поверхностей нагрева котлов, в состоянии поставки на объекты тепловой генерации. Схема нарезки и маркировки образцов представлена на рис. 1. Микрорельеф поверхности изучался по всей окружности трубы. Для изучения градиента характеристик структуры по толщине стенки из трубы было вырезано кольцо, которое условно было разделено на четыре сегмента (обозначены 1, 2, 3, 4 на рис. 1). Стенка каждого сегмента трубы была разделена на шесть равных по толщине участков, пронумерованных в последовательности от внешней к внутренней поверхности трубы (1, 2, 3, ..., 6), в каждом из которых изучалась микроструктура (число полей зрения на каждом участке составило 30, площадь анализа – 7,8 мм<sup>2</sup>) и микротвердость. Для морфологического анализа структурных составляющих стали и оценки качества поверхности применялся металлографический анализатор фрагментов микроструктуры твердых тел «Ресурс С7», включающий в себя инвертированный микроскоп Olympus GF41 с программным обеспечением SIAMS Photolab (относительная погрешность измерений от  $\pm 0,25\%$  (при увеличении до  $\times 500$  включительно) до  $\pm 0,65\%$  (при увеличении свыше  $\times 500$ )). Измерение микротвердости проводилось прибором ПМТ-3.

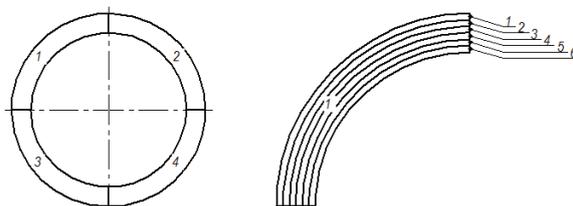
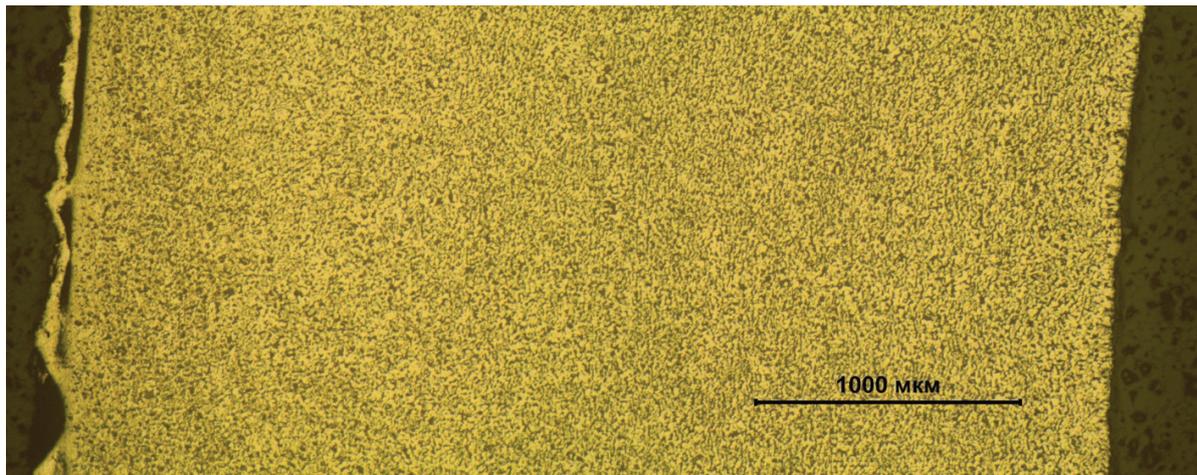


Рис. 1. Схема нарезки и маркировки образцов  
Fig. 1. Scheme of cutting and labeling of samples

## Результаты и их обсуждение

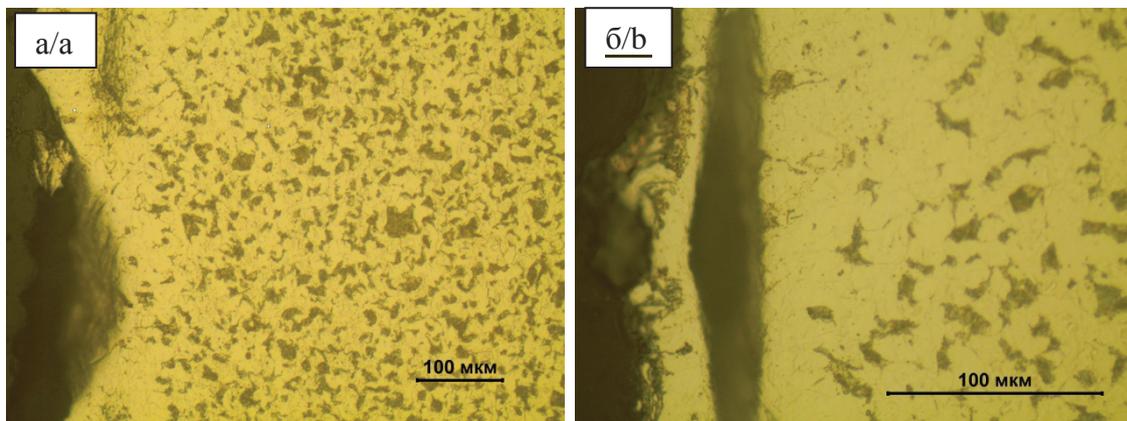
На рис. 2 представлена микроструктура поперечного сечения стенки трубы в сегменте № 1. На наружной поверхности трубы имеются дефекты типа раскатанной корочки, представляющие собой частичное отслоение металла. Глубина дефекта составляет 63 мкм (рис. 3, б), что не превышает допустимой величины 300 мкм. Вблизи наружной поверхности по всей окружности трубы структура состоит из неравноосных зерен феррита и перекристаллизованного перлита (рис. 3, а). Присутствует обезуглероженный слой толщиной до 100 мкм. В остальных исследуемых участках структура состоит из равновесного феррита и перлита.

Кроме названных выше неоднородностей, на наружной поверхности сегмента № 3 обнаружены межкристаллитные трещины различной глубины – от 39,3 до 65,0 мкм (рис. 4). Трещины идут вглубь по нормали к поверхности и образованы



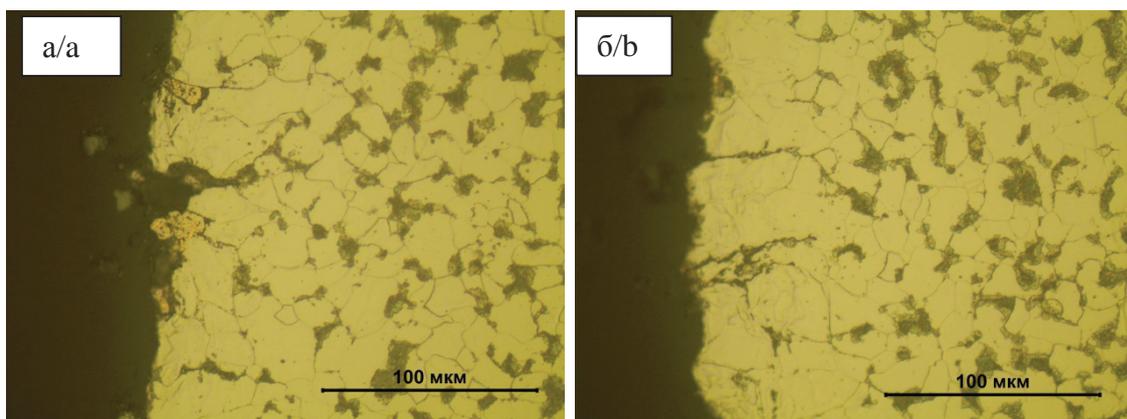
**Рис. 2.** Микроструктура в поперечном сечении стенки трубы сегмента № 1

**Fig. 2.** Microstructure in the cross section of segment 1 pipe wall



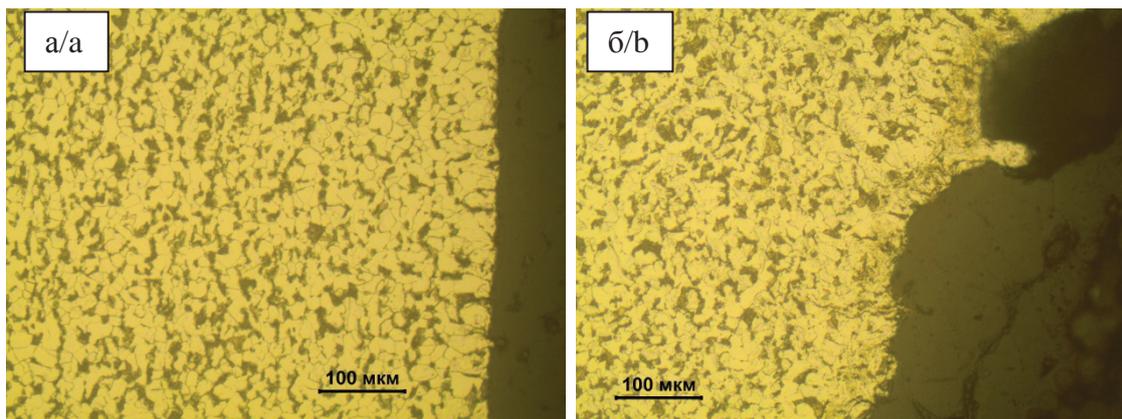
**Рис. 3.** Микроструктура вблизи наружной поверхности стенки трубы сегмента № 1: а) при 200-кратном увеличении; б) при 500-кратном увеличении

**Fig. 3.** Microstructure near the outer surface of segment 1 pipe wall: a) at 200 magnification; b) at 500 magnification



**Рис. 4.** Микроструктура вблизи наружной поверхности стенки трубы сегмента № 3. Трещины глубиной до: а) 39,3; б) 65,0 мкм

**Fig. 4.** Microstructure near the outer surface of segment 3 pipe wall. Cracked up to: a) 39,3; b) 65,0  $\mu\text{m}$  depth



**Рис. 5.** Микроструктура вблизи внутренней поверхности стенки: а) трубы сегмента № 1 (дефекты отсутствуют, изменений структуры нет); б) сегмента № 3 (обнаружены дефекты и изменение структуры)

**Fig. 5.** Microstructure near the inner surface of the wall of: a) segment 1 pipe (no defects, no structural changes); b) segment 3 (defects and changes in the structure were detected)

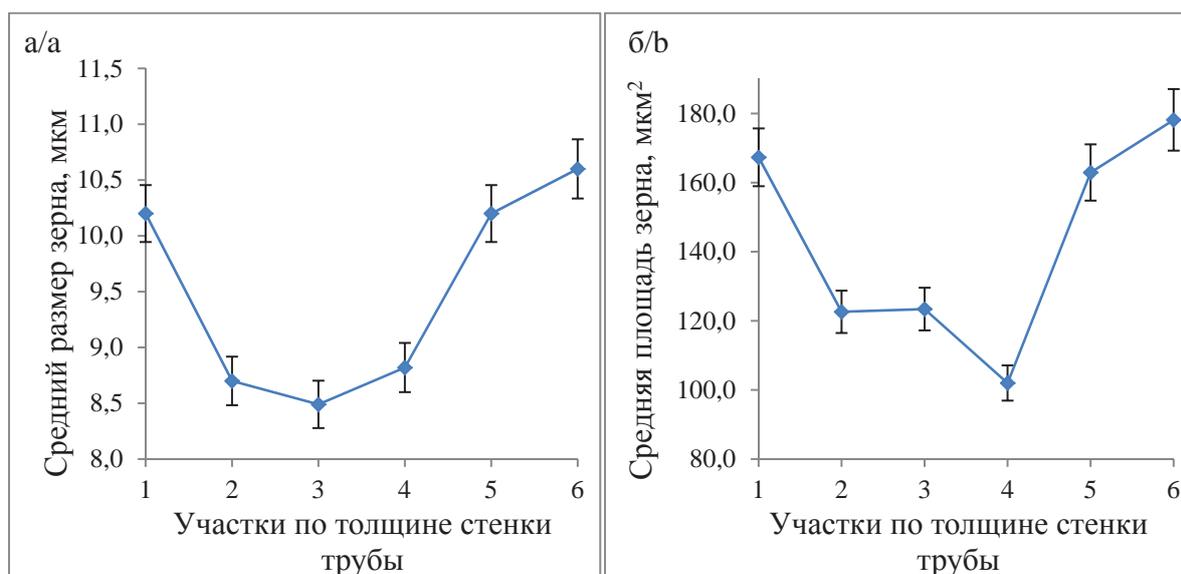
вследствие напряжений, связанных с неравномерным нагревом и охлаждением. Присутствует также обезуглероженный слой толщиной до 88 мкм.

На внутренней поверхности трубы неоднородности менее выражены, только в сегменте № 3 обнаружены технологические дефекты в виде канавок с закругленным дном, сопровождающиеся изменением структуры (рис. 5, а, б).

Как было отмечено выше, в состоянии поставки трубы могут обладать и существенной микроструктурной неоднородностью. Общепринятыми характеристиками микроструктуры стали являются размеры зерен. Результаты измерения среднего размера и средней площади зерен в каждом участке сегментов трубы приведены на рис. 6 и свидетельствуют об уменьшении зерен по мере прибли-

жения к центру стенки трубы. Наличие такой закономерности изменения размерных параметров зерен по толщине стенки трубы указывает на воздействие градиента температуры и скорости охлаждения в процессе производства тонкостенных труб из стали 20.

Оценить анизотропию механических свойств по толщине стенки трубы можно измерением микротвердости, поскольку микротвердость связана с механическими свойствами сталей простыми зависимостями [15]. Полученная зависимость изменения микротвердости по толщине стенки трубы, приведенная на рис. 7, показывает непрерывное уменьшение в направлении от внешней поверхности к внутренней, за исключением участка, непосредственно прилегающего к внутренней поверхности.



**Рис. 6.** Изменение среднего размера зерен (а) и средней площади зерен (б) по толщине стенки трубы

**Fig. 6.** Change in the average grain size (a) and the average area of grains (b) on tube wall thickness

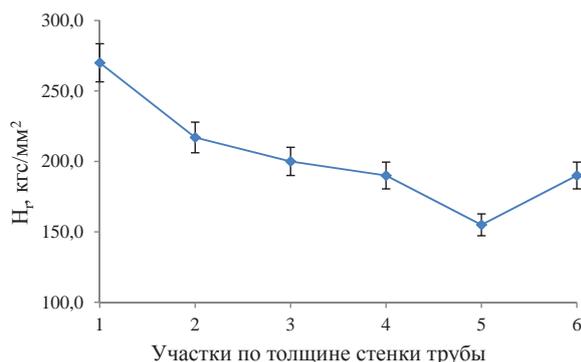


Рис. 7. Изменение микротвердости по толщине стенки трубы

Fig. 7. Change of microhardness over the pipe wall thickness

При этом максимальные значения микротвердости стенки трубы имеет в области, близкой к наружной поверхности, несмотря на наличие на указанном участке «мягкой» ферритной обезуглероженной прослойки. Это может быть связано с внутренними напряжениями, формирующимися при дефектной микроструктуре. Затем идет постепенное снижение величины микротвердости по толщине стенки трубы, а вблизи внутренней поверхности микротвердость опять увеличивается. Возможная причина такого распределения микротвердости состоит в отклонениях режимов термообработки при изготовлении трубы. Указанное состояние наружной поверхности может привести к скрытому трещинообразованию и ускорению структурно-язвенной коррозии.

Одновременное с этим обезуглероживание поверхностной зоны нежелательно для котельных труб [2], по причине уменьшения ее прочности, твердости и, соответственно, сопротивления деформации. Поэтому при металлографическом анализе вырезок труб для оценки возможности продления срока службы по критериям оценки состояния металла обезуглероженный слой глубиной более 200 мкм не допускается [16]. Связано это с тем, что неизбежная деградация структуры котельной стали совместно с коррозионными процессами на поверхности металла труб в процессе эксплуатации приводит к обезуглероживанию, которое сопровождается образованием микротрещин вдоль границ зерен и может вызвать разрыв трубы [17, 18]. В процессе эксплуатации продукты коррозии накапливаются в трещинах, где они, по мере увеличения своего объема, расклинивают металл, вызывая локальный рост напряжений до величины, близкой к пределу пластичности. На этой стадии возможно также возникновение хрупких разрушений оставшегося сечения при напряжениях, превышающих предел прочности. Разрушения такого типа могут происходить без значительного уменьшения толщины стенки трубы.

Наличие отслоений под наружной поверхностью, как и локальных дефектов с внутренней стороны трубы, усугубляет деградацию этих свойств, а также и коррозионной стойкости трубы. Известно, что любые факторы, приводящие к нарушению

защитного слоя на стали и увеличивающие рельеф поверхности, ускоряют скорость реакции [17]. В этом случае стоит ожидать доминирующее проявление коррозионных процессов на внутренней поверхности трубы в виде язвенных поражений, а при условии значительной протяженности канавок – коррозию бороздками.

#### Заключение

Анализ микрорельефа наружной и внутренней поверхности показал наличие различных типов дефектов на сегментах трубы. Наличие развитой наружной и внутренней поверхностей труб является предпосылкой для скопления на ней отложений, трудноудаляемых при эксплуатации теплообменного оборудования. Неравномерность распределения дефектов по поверхности трубы обуславливает неравномерность прочностных и эксплуатационных свойств, что способствует нарушению надежности работы трубных систем. Кроме того, вершины дефектов являются концентраторами напряжений и служат началом развития эксплуатационных повреждений. По результатам измерения микротвердости в состоянии поставки трубы также зафиксирована по толщине стенки структурная неоднородность и перепад размерных параметров микроструктуры, что указывает на наличие градиента температуры и скорости охлаждения в производстве труб. Образовавшийся структурный градиент приводит к существенным изменениям скорости развития повреждения.

Таким образом, в исследованном образце трубы в состоянии поставки обнаружены дефекты, которые, с одной стороны, находятся в рамках требований технических условий на поставку, а с другой стороны, уже достигли половины браковочного уровня для эксплуатируемых труб. В свете этого выполненная работа показывает, что для практических целей безаварийной эксплуатации и продления срока службы тепловоспринимающих элементов, изготовленных из стали 20, следует проводить дополнительные мероприятия, улучшающие эксплуатационные свойства труб поверхностей нагрева.

На основе анализа выполненных экспериментальных исследований в качестве таких мероприятий, направленных на улучшение свойств поверхности и снижение структурной неоднородности труб, можно рассматривать отдельные режимы термообработки, получившие научное обоснование [5, 19] и доступные для осуществления даже в условиях теплоэнергетики компаний.

В качестве способа, улучшающего приповерхностные характеристики трубной стали 20, подходит режим паровоздушной обработки труб [20]. Его эффективность определяется разработанными основами подавления структурной коррозии путем устранения электрохимической неоднородности термообработкой образцов в паровоздушной среде при температуре раскрытия микротрещин со снижением интенсивности межкристаллитной коррозии на один-два порядка.

Другим средством, повышающим однородность и уменьшающим перепады микроструктуры по толщине стенки трубы [21], способен служить режим двукратной нормализации при 920 °С, при котором формируется сорбитообразная структура,

увеличивающая коррозионную стойкость стали 20, применяемой в теплоэнергетике для изготовления труб поверхностей нагрева, на 38...51 %, а глубина межкристаллитных трещин при этом сокращается в 1,5 раза.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Березина Т.Г. Коррозия металла деталей теплоэнергетического оборудования. – Челябинск: ЧФ ПЭИПК, 2000. – 58 с.
2. ТУ 14-ЗР-55-2001. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. – М.: РНИИТП, 2001. – 84 с.
3. Артамонцев А.И. Коррозионные проявления микроструктурных повреждений в трубах теплопринимающих элементов и трубопроводных систем: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2007. – 120 с.
4. Помазова А.В., Панова Т.В., Геринг Г.И. Влияние разнородности структуры на коррозионную стойкость наружной поверхности труб из углеродистой стали 20, применяемых в теплоэнергетике // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2014. – Т. 14. – № 4. – С. 37–44.
5. Помазова А.В., Панова Т.В., Геринг Г.И. Роль структурных факторов в повышении коррозионной стойкости трубной стали при циклической термообработке // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 5. – С. 15–21.
6. Effects of annealing temperature on microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 30 % Cr super ferritic stainless steel / Li M, Shengsun Hua, Junqi Shena, Jian Han // Materials Letters. – 2016. – № 184. – P. 204–207.
7. Effect of microstructure and crystallography on sulfide stress cracking in API-5CT-C110 casing steel / M. Liu, C.D. Yang, G.H. Cao, A.M. Russell, Y.H. Liu, X.M. Dong, Z.H. Zhang // Materials Science and Engineering: A. – 2016. – № 671. – P. 244–253.
8. Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В. Коррозия и защита от коррозии. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 416 с.
9. Тумановский А.Г., Резинских В.Ф. Стратегия продления ресурса и технического перевооружения тепловых электростанций // Теплоэнергетика. – 2001. – № 6. – С. 3–10.
10. Скоробогатых В.Н., Борисов В.П., Щенкова И.А. Перспективы совершенствования трубной продукции для изготовления котлов и паропроводов высокого и сверхкритического давления // Теплоэнергетика. – 2001. – № 4. – С. 60–61.
11. Влияние качества поверхности канала труб на стойкость против межкристаллитной коррозии / Ан.В. Серебряков, Е.Л. Шулин, Ал.В. Серебряков, А.А. Богатов, И.М. Вдоветти // Metallurg. – 2004. – № 11. – С. 53–55.
12. Bergant M., Yawny A., Perez Ipiña J. Failure Assessment Diagram in Structural Integrity Analysis of Steam Generator Tubes // Procedia Materials Science. – 2015. – № 8. – P. 128–138.
13. Bergant M., Yawny A., Perez Ipiña J. Estimation procedure of J-resistance curves for through wall cracked steam generator tubes // Procedia Materials Science. – 2012. – № 1. – P. 273–280.
14. Пискаленко В.В. Эволюция структурно-фазового состояния и механических свойств котельных сталей: дис. ... канд. техн. наук. – Новокузнецк, 2002. – 169 с.
15. Продление срока службы резервуаров для жидкой двуокиси углерода. РД 26.260.129–9. – Волгоград: ВОПК «Волжский», 2000. – 31 с.
16. СТО 17230282.27.100.005–2008. Основные элементы котлов, турбин и трубопроводов ТЭС. Контроль состояния металла. Нормы и требования. – М.: РАО «ЕЭС России», 2008. – 658 с.
17. Улиг Г.Г., Ревя Р.У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику: пер. с англ. / под ред. А.М. Сухотина. – Л.: Химия, 1989. – 456 с.
18. Bulloch J.H., Hickey J.J. Defects in boiler evaporator tubes – a detailed case study concerning defect initiation and extension processes // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 1993. – № 56 (3). – P. 275–298.
19. Учет внутрискристаллических напряжений в процессах влияния структурной неоднородности на коррозионные повреждения теплообменных труб / Л.Л. Любимова, А.А. Макеев, А.С. Заворин и др. // Теплоэнергетика – 2014. – № 8. – С. 62–67.
20. Способ определения оптимальной температуры пассивации трубных элементов теплоэнергетического оборудования и устройство для коррозионных испытаний: пат. РФ № 2544313; заявл. 07.05.2013; опубл. 20.03.2015, Бюл. № 8. – 14 с.
21. Способ повышения коррозионной стойкости труб из малоуглеродистых сталей: пат. РФ № 2580256; заявл. 20.11.2014; опубл. 10.04.2016, Бюл. № 10. – 6 с.

Поступила 01.09.2016 г.

#### Информация об авторах

**Помазова А.В.**, начальник лаборатории разрушающего контроля ЗАО НДЦ НПФ «Русская лаборатория».

**Артамонцев А.И.**, кандидат технических наук, доцент кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Заворин А.С.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой парогенераторостроения и парогенераторных установок Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 669.1.017:620.18:620.19

## FEATURES OF MICROSTRUCTURAL INHOMOGENEITY OF STEEL 20 BOILER PIPES IN DELIVERY STATE

**Anna V. Pomazova<sup>1</sup>,**

pomazova@yandex.ru

**Aleksandr A. Artamontsev<sup>2</sup>,**

a\_art@tpu.ru

**Aleksandr S. Zavorin<sup>2</sup>,**

zavorin@tpu.ru

<sup>1</sup> Russian Laboratory Ltd. Research Examination Center,  
7/8, Gubkin Prospect, Omsk, 644035, Russia.

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

*Relevance of the research is caused by the need to minimize the corrosion losses of metal of tubular heating surfaces at their operation. This largely affects the urgency of the problem of ensuring the reliable operation of boiler units at thermal power plants and industrial power facilities. The increase in reliability and safety of operation of heat-mechanical power equipment, while improving the safety of life and reducing the risk of potential harm to operating personnel and the environment, is directly related to energy-efficient use of resources. The important aspect of the relevance of the work lies in the fact that the object of the study is carbon steel pipe (steel grade 20), which belongs to the most widely used in the Russian power engineering for manufacturing boilers heating surfaces.*

**The main aim** of the study is to analyze the microrelief of the outer and inner surface of new pipe size 60×6,0 mm, made of steel 20; to study structural heterogeneity in wall thickness and size of the microstructure parameters for predictive conclusions on the reliability and the prevailing mechanisms of damage that will be developed at operation; to investigate possible additional measures improving the operational properties and service life of pipes of heating surfaces.

**The methods used in the study:** metallographic methods of investigating the structural components of steel, micro-hardness measurement methods.

**The results.** Different types of defects (scab unrolled, intergranular cracks, defects in the form of grooves with rounded bottoms), which are evenly distributed over the surface of the pipe, were found on the surfaces in delivery state. The defects depth reaches a half of the acceptance level for the exploited pipes. Structural inhomogeneity and difference in dimensional parameters of microstructure are detected over the thickness of the pipe wall. The presence of these defects and inhomogeneity of the pipe material lead to significant changes in failure development rate and reduce the life of boiler tubes. The authors have proposed the proprietary methods to improve surface properties and reduce structural heterogeneity of the pipes. The methods (steam-pipe processing mode, double normalization mode at 920 °C) are available for implementing at thermal generation companies and reduce effectively the corrosion rate.

### Key words:

Steel 20, tube heating surfaces, structural inhomogeneity, surface defects, the resource of boiler tubes.

### REFERENCES

1. Berezina T.G. *Korroziya metalla detaley teploenergeticheskogo oborudovaniya* [Corrosion of metal parts of heat and power equipment]. Chelyabinsk, CHF PEIPK Publ., 2000. 58 p.
2. *TU 14-3R-55-2001. Truby stalnye besshovnye dlya parovykh kotlov i truboprovodov* [Specifications 143-R-552-001. Seamless steel tubes for boilers and pipelines]. Moscow, RNIITP Publ., 2001. 84 p.
3. Artamontsev A.I. *Korrozionnye proyavleniya mikrostrukturnykh povrezhdenii v trubakh teplosprinyimayushchikh elementov i truboprovodnykh sistem*. Dis. kand. nauk [Corrosive manifestations of microstructural damage in the heat exchanger elements and elements of piping systems. Cand. Diss.]. Tomsk, 2007. 120 p.
4. Pomazova A.V., Panova T.V., Gering G.I. Effect of structure inequigranular on corrosion of the external surface of carbon steel 20 pipes applied in thermal power generation. *Bulletin of the South Ural State University. Series «Metallurgy»*, 2014, vol. 326, no. 5, pp. 37–44. In Rus.
5. Pomazova A.V., Panova T.V., Gering G.I. Role of structural factors in improving corrosion resistance of pipe steel under cyclic heat treatment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 5, pp. 15–21. In Rus.
6. Li M., Shengsun Hua, Junqi Shena, Jian Han. Effects of annealing temperature on microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 30 % Cr super ferritic stainless steel. *Materials Letters*, 2016, no. 184, pp. 204–207.
7. Liu M., Yang C.D., Cao G.H., Russell A.M., Liu Y.H., Dong X.M., Zhang Z.H. Effect of microstructure and crystallography on sulfide stress cracking in API-5CT-C110 casing steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, no. 671, pp. 244–253.
8. Semenova I.V., Florianovich G.M., Khoroshilov A.V. *Korroziya i zashchita ot korrozii* [Corrosion and Corrosion Protection]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 416 p.
9. Tumanovskiy A.G., Rezinskikh V.F. *Strategiya prodleniya resursa i tekhnicheskogo perevoorzheniya teplovykh elektrostantsiy* [Strategy for life extension and modernization of thermal power plants]. *Thermal Engineering*, 2001, no. 6, pp. 3–10.
10. Skorobogatykh V.N., Borisov V.P., Shchenkova I.A. *Perspektivy sovershenstvovaniya trubnoy produktsii dlya izgotovleniya kotlov i paroprovodov vysokogo i sverkhkriticheskogo davleniya* [Prospects for improving tubular products to manufacture boilers and steam pipe-lines of high and supercritical high pressure]. *Thermal Engineering*, 2001, no. 4, pp. 60–61.

11. Serebryakov An. V. Vliyanie kachestva poverkhnosti kanala trub na stoykost protiv mezhkristallitnoy korrozii [Impact of tube channel surface quality on resistance to intergranular corrosion]. *Metallurg*, 2004, no. 11, pp. 53–55.
12. Bergant M., Yawny A., Perez Ipiña J. Failure Assessment Diagram in Structural Integrity Analysis of Steam Generator Tubes. *Procedia Materials Science*, 2015, no. 8, pp. 128–138.
13. Bergant M., Yawny A., Perez Ipiña J. Estimation procedure of J-resistance curves for through wall cracked steam generator tubes. *Procedia Materials Science*, 2012, no. 1, pp. 273–280.
14. Piskalenko V.V. *Evolutsiya strukturno-fazovogo sostoyaniya i mekhanicheskikh svoystv kotelnykh staley*. Dis. Kand. nauk [Evolution of structural and phase state and mechanical properties of boiler steel. Cand. Diss.]. Novokuznetsk, 2002. 169 p.
15. RD 26.260.1229-9-9. *Metodicheskie ukazaniya. Prodlenie sroka sluzhby rezervuarov dlya zhidkoy dnuokisi ugleroda* [Guidelines 26.260.129-9. Extending the life of reservoirs for liquid carbon dioxide]. Volgograd, Volzhskiy Publ., 2000. 31 p.
16. STO 17230282.27.100.005-2008. *Osnovnyye elementy kotlov, turbin i truboprovodov TES. Kontrol sostoyaniya metalla. Normy i trebovaniya* [Key elements of boilers, turbines and pipelines at TPP. Control of metal state. Standards and requirements]. Moscow, 2008. 658 p.
17. Uhlic H.H., Revie R.W. *Corrosion and corrosion control*. New York, John Wiley and Sons, 1985. 456 p.
18. Bulloch J.H., Hickey J.J. Defects in boiler evaporator tubes – a detailed case study concerning defect initiation and extension processes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1993, no. 56 (3), pp. 275–298.
19. Lyubimova L.L., Makeev A.A., Zavorin A.S. Consideration of intrastructural stresses in structural nonuniformity effect on corrosion damages inflicted to heat exchange pipes. *Thermal Engineering*, 2014, no. 8, pp. 62–67. In Rus.
20. Lyubimova L.L., Zavorin A.S., Lebedev B.V. *Sposob opredeleniya optimalnoy temperatury passivatsii trubnykh elementov teplo-energeticheskogo oborudovaniya i ustroystvo dlya korroziyonnykh ispytaniy* [Method for determining the optimum temperature passivation of tubular heat power equipment and apparatus for corrosion testing]. Patent RF, no. 2544313, 2015.
21. Pomazova A.V., Panova T.V., Gering G.I. *Sposob povysheniya korroziionnoy stoykosti trub iz malouglerodistykh staley* [Method for improving corrosion resistance of low carbon steel pipes]. Patent RF, no. 2580256, 2016.

Received: 1 September 2016.

#### Information about the authors

**Anna V. Pomazova**, the head of the laboratory, Russian Laboratory Ltd. Research Examination Center.

**Aleksandr A. Artamontsev**, Cand. Sc., associated professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Aleksandr S. Zavorin**, Dr. Sc., professor, head of the department, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 544.55:537.523.9:66.088

## ОКИСЛИТЕЛЬНАЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКАЯ КОНВЕРСИЯ СЕРОВОДОРОДА В АТМОСФЕРЕ ГАЗООБРАЗНЫХ АЛКАНОВ В ПРИСУТСТВИИ O<sub>2</sub> И CO<sub>2</sub>

Кудряшов Сергей Владимирович<sup>1</sup>,

ks@ipc.tsc.ru

Рябов Андрей Юрьевич<sup>1</sup>,

andrey@ipc.tsc.ru

Очердько Андрей Николаевич<sup>1</sup>,

andrew@ipc.tsc.ru

<sup>1</sup> Институт химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук,  
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4.

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью развития способов очистки кислых углеводородных газов от сероводорода для их подготовки к переработке или транспортировке в условиях нефтегазовых промыслов.

**Целью работы** является изучение закономерностей удаления сероводорода из метана и пропан-бутановой смеси с добавками кислорода, углекислого газа с использованием одно- и двухбарьерного плазмохимических реакторов в барьерном разряде.

**Методы исследования:** газовая хроматография, хромато-масс-спектрометрия, ИК-спектроскопия, элементный анализ.

**Результаты.** Изучены закономерности плазмохимической конверсии сероводорода в метане и пропан-бутановой смеси в барьерном разряде с добавками кислорода, углекислого газа. Установлено, что основными газообразными продуктами превращения смесей сероводорода с метаном/пропан-бутановой смесью с добавкой кислорода, CO<sub>2</sub> являются водород, углеводороды C<sub>2+</sub>, оксиды углерода и метилмеркаптан (при добавлении углекислого газа образование метилмеркаптана не наблюдается), на электродах реактора образуется депозит. Обнаружено, что при добавлении кислорода к смеси метана с сероводородом зависимость конверсии сероводорода от концентрации кислорода имеет экстремальный характер. В случае с пропан-бутановой смесью добавка кислорода приводит только к снижению конверсии H<sub>2</sub>S. При добавлении CO<sub>2</sub> к углеводородным газам в обоих случаях происходит рост конверсии сероводорода. Установлено, что энергозатраты на обработку смесей метана с сероводородом с добавками кислорода и углекислого газа выше, чем без добавок. Добавление CO<sub>2</sub> к сероводороду и пропан-бутановой смеси приводит к снижению энергозатрат, а добавление O<sub>2</sub> – к увеличению. Исследован образующийся на электродах реактора депозит. В его составе обнаружены полисульфиды линейного и циклического строения, а также сульфоны. Изучены кинетические закономерности плазмохимической конверсии сероводорода. На основании экспериментальных, литературных данных и результатов теоретических расчетов предложен механизм реакции. Механизм включает реакции инициирования электронами барьерного разряда исходных молекул углеводородов и сероводорода с образованием атомарных водорода и кислорода, SH и алкильных радикалов. Дальнейшие превращения образовавшихся частиц происходят по радикально-цепному механизму преимущественно до полисульфидных соединений с концевыми алкильными и кислородсодержащими группами.

### Ключевые слова:

Плазмохимическая конверсия, сероводород, газообразные алканы, метан, пропан-бутановая смесь, кислород, углекислый газ, барьерный разряд.

### Введение

Литературные данные последних десятилетий показывают значительный интерес исследователей к плазмохимическим методам конверсии сероводорода преимущественно с целью получения водорода и серы [1–11]. Заметные успехи в этом направлении были достигнуты в СССР, где технология с использованием СВЧ-разряда опробована в промышленном масштабе [1]. Также обнадеживающие результаты получены с использованием других видов электрических разрядов, например тлеющего разряда низкого давления, скользящего дугового разряда [1–5]. Однако, как и в процессе Клауса, эти методы требуют предварительного выделения сероводорода из потока углеводородного сырья. Зачастую это экономически нецелесообразно или ограничено техническими возможностями, в частности из-за удаленности промыслов от перерабатывающих заводов. Применение этих методов для прямой очистки углеводородных газов от серо-

водорода приведет к нежелательной глубокой деструкции углеводородов. Использование коронного и барьерного разрядов (БР) обеспечивает менее жесткие условия протекания процесса. Подавляющее большинство существующих работ по разложению сероводорода в БР и коронном разряде выполнено с использованием балластных газов – Ar, He, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> [6–11]. Найдены только 2 работы по удалению сероводорода из метана и биогаза в БР [6, 11]. Этих данных недостаточно для оценки практической перспективности прямой очистки углеводородных газов от сероводорода с использованием БР. В связи с этим разработка способа удаления H<sub>2</sub>S из углеводородов является актуальной задачей.

Ранее нами была показана принципиальная возможность удаления сероводорода из метана и пропан-бутановой смеси (ПВС), найдены условия, обеспечивающие высокую эффективность процесса, приводящие к образованию ценных органиче-

ских полисульфидов [12, 13]. В данной работе представлены результаты исследования процесса очистки метана и ПБС от сероводорода под действием БР с добавками кислорода и углекислого газа. Полученные данные необходимы при разработке плазмохимических процессов очистки попутного нефтяного газа от сероводорода с высоким содержанием углекислого газа, а также биогаза – перспективного сырья для альтернативной энергетики [14, 15].

#### Методическая часть

Эксперименты проводили на лабораторной установке, которая подробно описана в работах [12, 13]. Использовались два типа плазмохимических реакторов: однопольный с планарным расположением электродов и коаксиальный с двумя диэлектрическими барьерами. Конструкция однопольного реактора предусматривала возможность регистрации эмиссионных спектров БР оптоволоконным спектрометром AVASPEC 2048.

Во всех экспериментах температура стенок реакторов составляла 20 °С, давление – атмосферное, время контакта исходной газовой смеси с разрядной зоной реактора – 13,6 с для обоих типов реактора (расход смеси для однопольного реактора 55 мл/мин, для двухпольного – 36 мл/мин). При проведении исследований использован метан (чистота 99,99 %) и ПБС состава: пропан 64 % об., бутан 10 % об., изобутан 23 % об. Начальная концентрация сероводорода – 3 % об.

Типичные осциллограммы высоковольтных импульсов напряжения и вольт-кулоновская характеристика (ВКХ) приведены на рис. 1, 2.

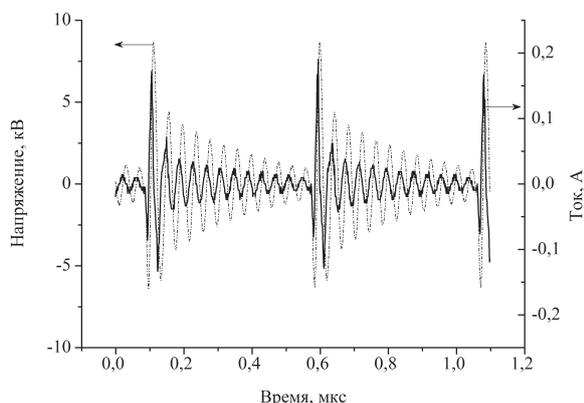


Рис. 1. Типичные осциллограммы импульса напряжения и тока БР

Fig. 1. Typical oscillograms of voltage pulses and barrier discharge (BD) current

На высоковольтный электрод реактора подаются формируемые генератором высоковольтные импульсы напряжения переменной полярности (амплитуда до 10 кВ, частота следования до 2 кГц) в виде затухающих колебаний приблизительно синусоидальной формы (рис. 1). Декремент затухания колебаний в основном определяется внутрен-

ними потерями энергии в электрической схеме генератора, выходной импеданс которого значительно превышает импеданс нагрузки (реактор). В промежутках между импульсами напряжения колебания практически полностью затухают, а основная энергия вводится в разряд на первом периоде колебаний напряжения.

Активную мощность разряда ( $W$ ) рассчитывали по формуле

$$W = f \cdot E, \quad (1)$$

где  $f$  – частота повторения импульсов напряжения (Гц);  $E$  – энергия (Дж) за один импульс напряжения, рассчитанная на основании ВКХ (рис. 2).

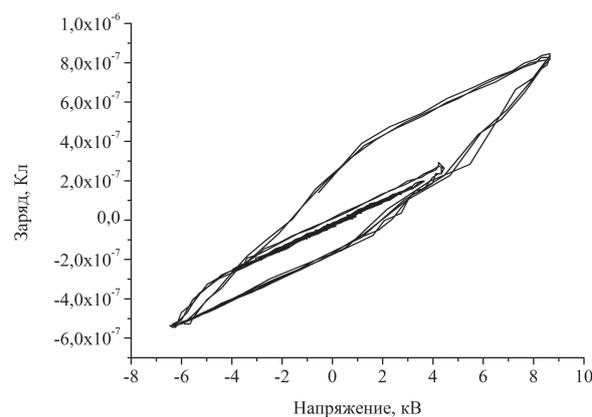


Рис. 2. Типичная вольт-кулоновская характеристика БР

Fig. 2. Typical BD Lissajous figure

Активная мощность БР для однопольного реактора составила ~ 15 Вт, для двухпольного ~ 5–9 Вт в зависимости от состава исходной газовой смеси.

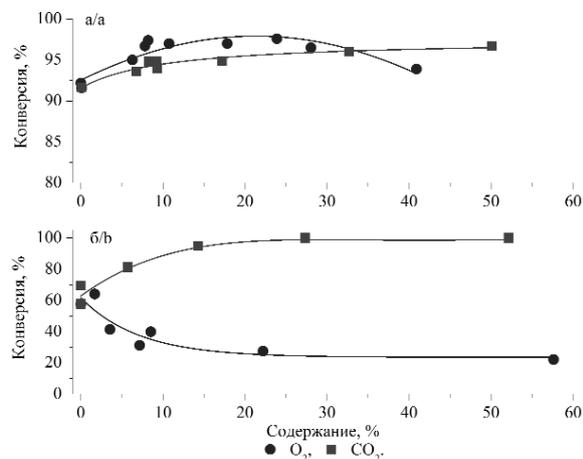
Анализ исходной и обработанной газовых смесей выполнен на газовом хроматографе HP 6890, оборудованном детектором по теплопроводности с использованием набивной колонки (длина 3 м, диаметр 3 мм, сорбент – порapak QS), в изотермическом режиме. Температура колонки для случая с метаном – 70 °С, в случае ПБС – 120 °С, газ-носитель – гелий. Водород проанализирован с использованием набивной колонки (длина 1 м, диаметр 3 мм, сорбент – молекулярное сито с диаметром пор 5 Å). Температура колонки – 40 °С, газ-носитель – аргон.

Идентификация газообразных продуктов выполнена путем сравнения времён удерживания индивидуальных веществ. Количественный анализ газообразных продуктов в послереакционной газовой смеси проведён с использованием метода нормировки с учетом поправочных коэффициентов чувствительности детектора к компонентам анализируемой смеси.

Образующийся на электродах реактора депозит изучен методами элементного анализа (CHNOS анализатор Vario EL Cube), ИК-спектроскопии (ИК-спектрометр Nicolet 5700 FT-IR), хромато-масс-спектрометрии (хромато-масс-спектрометр Thermo Scientific DFS).

### Результаты и их обсуждение

На рис. 3 приведена конверсия сероводорода в смесях с метаном и ПБС с добавками кислорода и углекислого газа.



**Рис. 3.** Конверсия сероводорода в смесях с метаном и ПБС с добавками кислорода и CO<sub>2</sub>: а) смеси метана с сероводородом, двухбарьерный реактор; б) смеси ПБС с сероводородом, однобарьерный реактор

**Fig. 3.** H<sub>2</sub>S conversion in mixtures with methane and liquid petroleum gases (LPG) with additions of oxygen and CO<sub>2</sub>: a) methane-H<sub>2</sub>S mixtures, two dielectric barrier reactor; b) LPG-H<sub>2</sub>S mixtures, one dielectric barrier reactor

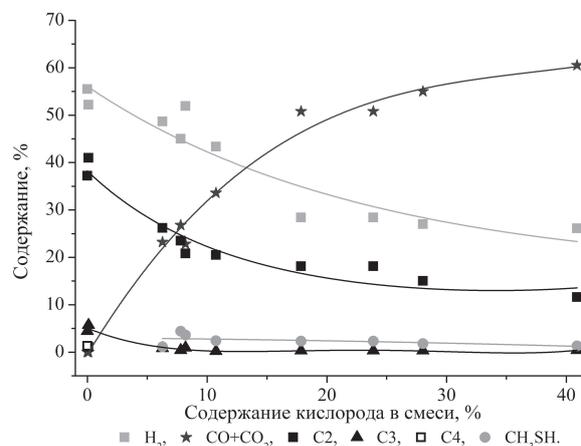
Видно, что добавка CO<sub>2</sub> к углеводородным газам в обоих случаях приводит к увеличению конверсии сероводорода. Для ПБС изменение конверсии наиболее значительное. Увеличение концентрации CO<sub>2</sub> в исходной смеси до 15 % об. приводит к росту конверсии сероводорода с 60 до 98 % об. В случае удаления сероводорода из метана с добавкой CO<sub>2</sub> конверсия сероводорода увеличивается до ~96 % об.

Добавление кислорода в смесь ПБС с сероводородом приводит только к снижению конверсии последнего с 60 до 30 % об. В случае с метаном вначале наблюдается небольшой рост конверсии сероводорода до ~96 % об., дальнейшее увеличение концентрации кислорода в исходной смеси приводит к снижению конверсии до исходных значений.

На рис. 4 приведен состав газообразных продуктов реакции на примере смесей метана с сероводородом с добавками кислорода в различной концентрации.

Наблюдаемый рост суммарной концентрации оксидов углерода в продуктах реакции свидетельствует об интенсивном окислении метана, что косвенно подтверждается снижением суммарной концентрации углеводородов C<sub>2+</sub> и водорода. Экстремальная форма зависимости конверсии сероводорода от начальной концентрации кислорода в исходной смеси обусловлена реакциями окисления метана. При начальной концентрации кислорода более 30 % об. процессы окисления метана начинают преобладать над процессами, приводящими к деструкции сероводорода. В случае удаления се-

роводорода из ПБС это проявляется более явно, поскольку компоненты ПБС окисляются значительно легче метана, что сразу приводит к снижению конверсии сероводорода при добавлении кислорода в исходную смесь (рис. 3). Более подробно механизм удаления сероводорода из метана и ПБС описан ниже.



**Рис. 4.** Состав газообразных продуктов реакции в смеси метан-сероводород с добавками кислорода

**Fig. 4.** Composition of gaseous products in the H<sub>2</sub>S-methane mixture with oxygen addition

Необходимо отметить, что при обработке смеси метана с сероводородом с добавками кислорода наблюдается образование метилмеркаптана до 3 % об.

При добавлении углекислого газа в смесь метана с сероводородом наблюдается похожая тенденция (рис. 4) – содержание углеводородов C<sub>2+</sub> и водорода в продуктах реакции снижается. При этом в послереакционных газах оксиды серы и метилмеркаптан также не обнаружены, что наглядно демонстрирует преимущество данного способа очистки углеводородных газов от сероводорода в сравнении с традиционными методами.

На рис. 5 приведены энергозатраты на удаление сероводорода из метана и ПБС в присутствии кислорода и углекислого газа.

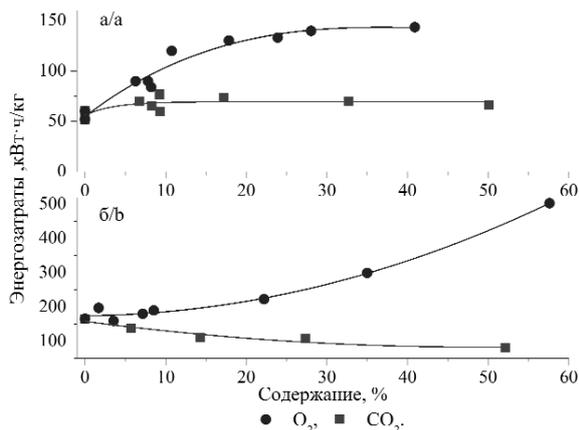
Видно, что добавка кислорода и углекислого газа к смеси метана с сероводородом во всех случаях приводит к повышению энергозатрат. Менее всего на энергозатраты влияет добавка углекислого газа, способствуя их незначительному повышению с 52 до 71 кВ·ч/кг, а в случае с ПБС – к существенному их снижению с 165 до 82 кВ·ч/кг.

Необходимо напомнить, что активная мощность разряда в двухбарьерном реакторе составляла 5–9 Вт, а в однобарьерном ~15 Вт.

Сравнение энергозатрат на удаление сероводорода в этих реакторах показывает, что выбор двухбарьерного типа реактора более предпочтителен для дальнейшей разработки метода.

В процессе удаления сероводорода из метана и ПБС на стенках реактора образуется депозит. Нами был исследован его элементный состав. Было установлено, что депозиты, полученные в атмосфере

ре метана и ПБС с добавкой 3 % об. сероводорода, имеют близкий элементный состав и содержат углерода 26 % мол., водорода 58 % мол., серы 16 % мол. Высокое содержание водорода позволяет отнести их к мягким полимерам из аморфного гидrogenизированного углерода (a-C:H), обладающим низкой плотностью [14]. При анализе элементного состава депозита, образующегося при удалении сероводорода из метана с добавками кислорода и оксида углерода, получены близкие значения содержания элементов C: H: S.



**Рис. 5.** Энергозатраты на удаление сероводорода из смесей с метаном и ПБС с добавками кислорода и  $\text{CO}_2$ : а) смеси метана с сероводородом, двухбарьерный реактор; б) смеси ПБС с сероводородом, однобарьерный реактор

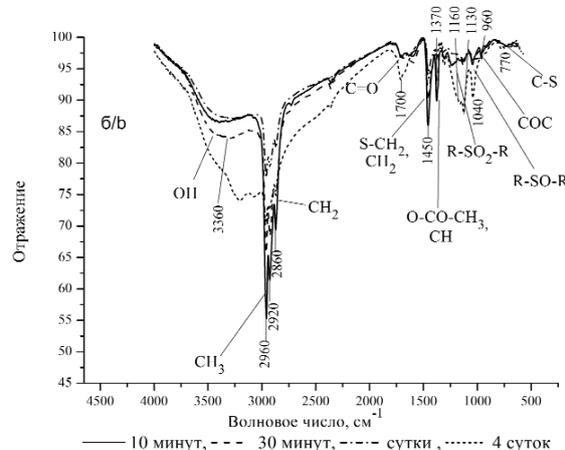
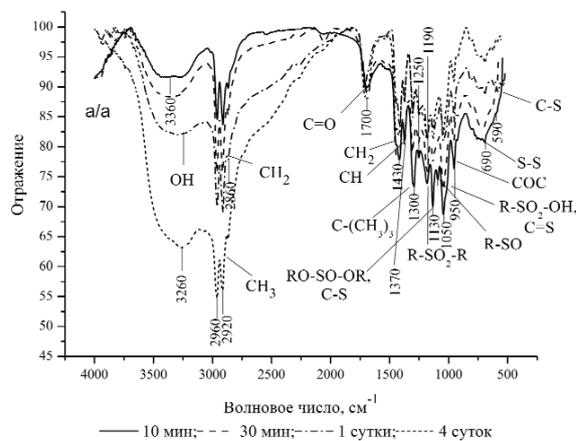
**Fig. 5.** Power consumptions for  $\text{H}_2\text{S}$  removal from mixtures with methane and LPG with additions of oxygen and  $\text{CO}_2$ : а) methane- $\text{H}_2\text{S}$  mixtures, two dielectric barrier reactor; б) LPG- $\text{H}_2\text{S}$  mixtures, one dielectric barrier reactor

Достоверно определить содержание кислорода в депозите не удается, поскольку он интенсивно окисляется и после извлечения из реактора. Представление о динамике окисления депозита из смеси метан/ПБС-сероводород (3 % об.) можно получить на основании изменения интенсивности полос поглощения в ИК-спектрах образцов, записанных в разное время после их извлечения из реактора (рис. 6).

Видно, что с течением времени в спектре увеличивается интенсивность полос поглощения, характерных для гидроксильной, сульфокислотной, сульфокислотной, сульфокислотной, сульфокислотной групп, что свидетельствует о значительном количестве дефектов в молекулярной структуре депозита, преимущественно связанных с разрывом C-C и C-H-связей, которые стимулируют протекание реакций окисления на поверхности и, возможно, в его объеме. Такие явления обычны для только что полученных a-C:H-материалов [16–18].

Полученный при очистке углеводородных газов от сероводорода депозит растворяется в различных растворителях (ацетон, бензол, н-гексан) и может быть смыт со стенок реактора и электродов. В результате хромато-масс-спектрометрического анализа полученных растворов было установлено,

что ацетон и бензол хорошо экстрагирует из депозита полисульфидные соединения циклического и линейного строения, а н-гексан – преимущественно линейного строения. При добавлении кислорода и углекислого газа к исходной смеси углеводородов и сероводорода в ацетоновых экстрактах депозита были обнаружены сульфоны различного строения. Для случая с добавкой  $\text{CO}_2$  в ацетоновых экстрактах депозита наблюдается снижение содержания полисульфидных соединений циклического строения, а для случая с добавкой кислорода – и значительное уменьшение содержания всех полисульфидных соединений циклического и линейного строения.



**Рис. 6.** ИК-спектры депозита: а) смеси метана с сероводородом; б) смеси ПБС с сероводородом

**Fig. 6.** IR spectra of deposit: а) methane- $\text{H}_2\text{S}$  mixtures; б) LPG- $\text{H}_2\text{S}$  mixtures

### Механизм процесса

Для дальнейшей интерпретации экспериментальных данных рассмотрим основные стадии возможного механизма (ВМ) разложения сероводорода в метане в присутствии углекислого газа и кислорода.

Инициирование химических превращений в электрических разрядах происходит при воздействии электронов разряда на молекулы исходной

смеси. Образовавшиеся частицы на стадии разрядного инициирования реакции участвуют в дальнейших химических превращениях с образованием стабильных продуктов.

Анализ потерь энергии электронов БР при столкновении с молекулами исходной смеси позволяет оценить состав частиц, образовавшихся на стадии разрядного инициирования реакции, и дальнейшее направление ее протекания. В таблице приведены расчетные значения потерь энергии электронов в смесях  $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{S}$  и  $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{S-O}_2/\text{CO}_2$  и их средняя энергия.

Расчет выполнен с использованием программы Bolsig+ [19], сечения рассеяния электронов молекулами метана взяты из [20]. В литературе практически отсутствуют данные по сечениям возбуждения колебательных и электронных состояний сероводорода. Поэтому эти сечения были получены компиляцией литературных данных по полным сечениям рассеяния, упругих столкновений и ионизации [21, 22–25]:

$$\sigma_{\text{эл}}(\varepsilon) = \sigma_{\text{полн}}(\varepsilon) - \sigma_{\text{упр}}(\varepsilon) - \sigma_{\text{ион}}(\varepsilon), \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – энергия электронов,  $\sigma_{\text{эл}}(\varepsilon)$ ,  $\sigma_{\text{полн}}(\varepsilon)$ ,  $\sigma_{\text{упр}}(\varepsilon)$ ,  $\sigma_{\text{ион}}(\varepsilon)$  – сечения возбуждения электронных состояний, полного рассеяния электронов, упругих столкновений, ионизации.

**Таблица.** Потери энергии электронов в смесях  $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{S}$  и  $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{S-O}_2/\text{CO}_2$  и средние энергии электронов ( $\text{H}_2\text{S}$  3 % об.,  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  10 % об.,  $E/N=90$  Тд)

**Table.** Electron energy losses in the mixtures  $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{S}$ , and  $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{S-O}_2/\text{CO}_2$  and mean electron energy ( $\text{H}_2\text{S}$  3 % vol.,  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  10 % vol.,  $E/N=90$  Td)

Канал потерь/Energy loss channel	$\text{CH}_4$	$\text{CH}_4\text{-O}_2$	$\text{CH}_4\text{-CO}_2$
Метан/Methane			
Колебания/Vibrations	47,1	39,6	37,9
Возбуждение электронных состояний Electronic state excitations	20,5	17,4	18,1
Ионизация/Ionization	0,3	0,2	0,2
Сероводород/Hydrogen sulfide			
Колебания + возбуждение электронных состояний Vibrations + Electronic state excitations	31,4	29,6	28,1
Ионизация/Ionization	0,1	0,1	0,1
Прилипание/Attachment	0,04	0,04	0,04
Средняя энергия электронов, эВ Mean electron energy, eV	3,9	3,8	3,9

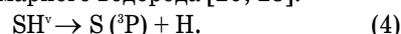
Видно, что добавка кислорода и углекислого газа к смеси метана с сероводородом не оказывает существенного влияния на среднюю энергию и распределение потерь энергии электронов по внутренним степеням свободы компонентов исходной смеси. Основные потери энергии электронов приходятся на возбуждение колебаний молекулы метана в основном электронном состоянии (~38–47 %) и его электронных состояний (~17–20 %). Суммарные потери на возбуждение колебательных и электронных уровней сероводорода составляют ~28–31 %. Суммарные потери на

ионизацию во всех случаях составляют не более 0,04 %. Подобное распределение потерь энергии электронов сохраняется и в случае замены метана на пропан, поэтому эти данные не приведены в таблице.

Диссоциация сероводорода из электронно-возбужденных состояний преимущественно приводит к образованию SH радикала и атомарного водорода [26–30]:

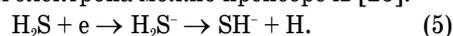


Известно, что фотодиссоциация сероводорода под действием света с длиной волны 193,3 нм может приводить к образованию колебательно-возбужденного SH радикала, который разлагается преимущественно до атомарной серы в основном состоянии и атомарного водорода [26, 28]:

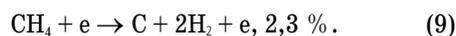
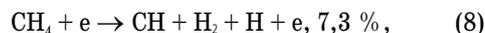
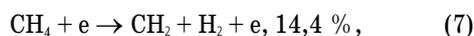
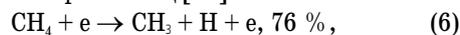


Несмотря на то, что средние энергии электронов БР в нашем случае ниже в ~1,7 раза, чем энергия фотона с длиной волны 193,3 нм (~6,4 эВ), в результате каскадного возбуждения молекулы сероводорода электронным ударом в БР возможно образование атомарной серы по реакциям (3), (4).

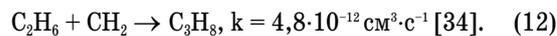
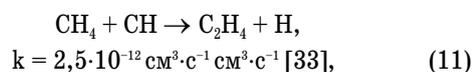
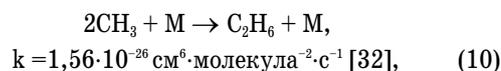
Из таблицы также видно, что процессом разложения сероводорода в результате диссоциативного прилипания электрона можно пренебречь [25]:



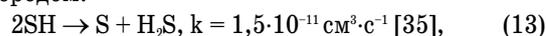
Диссоциация электронно-возбужденной молекулы УВ (на примере метана) сопровождается образованием набора частиц [31]:



А основные пути формирования основных продуктов процесса (газообразные  $\text{C}_2\text{-УВ}$  и полисульфидные соединения линейного и циклического строения) можно объяснить за счет следующих реакций:



Начальным этапом формирования полисульфидных соединений является образование атомарной серы в ходе реакции диспропорционирования SH радикала или его взаимодействия с атомарным водородом:



$\text{SH} + \text{H} \rightarrow \text{S} + \text{H}_2, k = 3,01 \cdot 10^{-11} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1} [35],$  (14)  
с последующей рекомбинацией атомарной серы до молекулярной:



Рост сульфидной цепи обеспечивается за счет реакций рекомбинации атомарной и молекулярной серы в газовой фазе и на поверхности электродов реактора, а также за счет присоединения углеводородных фрагментов к сульфидной цепи.

Протекание реакции (15) косвенно подтверждается эмиссионным спектром плазмы БР, полученным при проведении экспериментов по очистке метана от сероводорода (рис. 7). На рисунке видно широкую полосу излучения переходов  $S_2$  В–Х, которые вносят основной вклад в излучение БР [37]. В диапазоне 320–325 нм также излучают переходы SH А–Х радикала [38]. Однако из-за их низкой интенсивности они не рассматриваются.

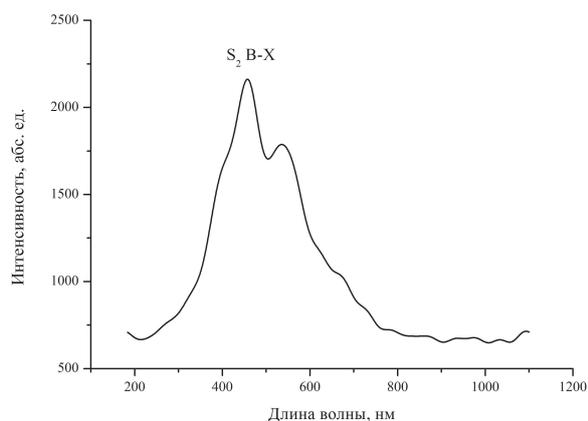
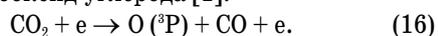


Рис. 7. Эмиссионный спектр БР в смеси метан-сероводород (3 % об.)

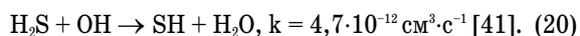
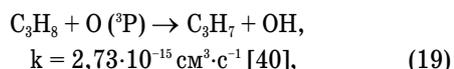
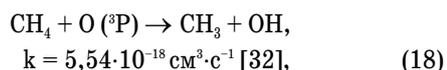
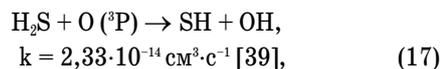
Fig. 7. Emitting spectrum of the BD in mixtures of  $H_2S$  (3 % vol.) with methane

Добавление углекислого газа и кислорода в смесь углеводородов с сероводородом приводит к появлению новых каналов превращения исходных соединений. В обоих случаях при удалении сероводорода как из метана, так и из ПБС, наблюдается увеличение конверсии сероводорода (наиболее существенное в случае с ПБС, рис. 3).

Углекислый газ под действием электронов БР преимущественно разлагается на атомарный кислород и монооксид углерода [1]:



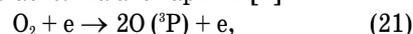
Атомарный кислород инициирует серию реакций, которые объясняют рост конверсии сероводорода:



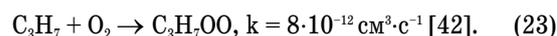
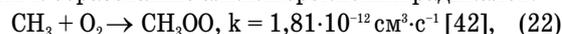
Теоретическая оценка показывает, что скорость генерации атомарного кислорода примерно одинаковая в обоих случаях, однако при удалении сероводорода из ПБС без добавки углекислого газа

его конверсия была значительно ниже, чем в случае с метаном, поэтому эффект от добавки углекислого газа на конверсию сероводорода в ПБС заметен сильнее.

Под действием электронов БР молекулярный кислород разлагается на атомарный [1]

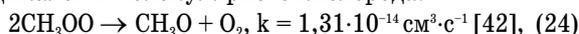


инициируя реакции (17)–(20), а также может приводить к образованию алкилперекисных радикалов:



По-видимому, дальнейшее превращение алкилперекисных радикалов и определяет разнонаправленный тренд конверсии сероводорода в метане и ПБС.

Метилперекисные радикалы диспропорционируют преимущественно с образованием метоксирадикалов и молекулярного кислорода:

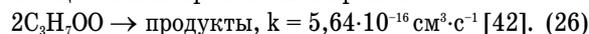


первые затем могут участвовать в разложении сероводорода:



Константа скорости реакции (25) в литературе не найдена, но её значение может быть на уровне константы скорости реакции сероводорода с гидроксильным радикалом (20).

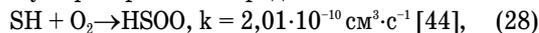
Диспропорционирование пропилперекисных радикалов приводит к образованию стабильных кислородсодержащих соединений, как правило, это ацетон или пропаналь и пропанол:



Таким образом, в случае удаления сероводорода из ПБС с добавкой кислорода отсутствует дополнительный канал разложения сероводорода, который есть при удалении сероводорода из метана по реакции (25). Более того, по-видимому, определенный вклад в разложение сероводорода вносят и алкильные радикалы. Например, известна реакция  $CH_3 + H_2S \rightarrow CH_4 + SH$ ,  $k = 9,56 \cdot 10^{-15} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$  [43]. (27)

Нельзя исключать возможность протекания подобных реакций и между пропильным радикалом и сероводородом, дающих вклад в конверсию сероводорода, несмотря на то, что константа скорости такой реакции в литературе не найдена. Следовательно, снижение концентрации пропильных радикалов в реакционном объеме за счет протекания реакции образования пропилперекисных радикалов (23) также является возможной причиной снижения конверсии сероводорода в ПБС.

Добавка молекулярного кислорода к смесям сероводорода с УВ также приводит к образованию гидросульфоперекисных радикалов:



дальнейшие превращения которых приводят к образованию различных метил- и этилзамещенных сульфонов, что наглядно видно на хромато-масс-спектрограммах экстрактов депозита.

Молекулярный кислород способствует образованию метилмеркаптана по реакции

$\text{CH}_3 + \text{SH} \rightarrow \text{CH}_3\text{SH}$ ,  $k = 1,66 \cdot 10^{-11} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$  [45], (29)  
за счет образования дополнительного количества SH-радикалов в результате протекания реакций (22), (24), (25).

#### Выводы

Таким образом, установлено, что добавка  $\text{CO}_2$  к углеводородным газам в обоих случаях приводит к увеличению конверсии сероводорода. Кислород в смеси с ПБС с сероводородом приводит только к снижению конверсии последнего. В случае с метаном вначале наблюдается небольшой рост конверсии сероводорода, затем происходит её снижение до исходных значений. Добавка кислорода и углекислого газа к смеси  $\text{CH}_4\text{--H}_2\text{S}$  и кислорода к смеси ПБС– $\text{H}_2\text{S}$  приводит к повышению энергозатрат на их обработку в БР. В смесях ПБС– $\text{H}_2\text{S}$ – $\text{CO}_2$  энергозатраты снижаются.

Основными газообразными продуктами превращения смесей метан/ПБС–сероводород с кислоро-

дом и углекислым газом являются водород, углеводороды  $\text{C}_{2+}$ , оксиды углерода. В случае кислорода в составе продуктов также обнаружен метилмеркаптан до 3 % об. Образующийся на электродах депозит представлен полисульфидами и сульфонами различного строения. В случае с  $\text{CO}_2$  в депозите наблюдается снижение содержания циклических полисульфидных соединений, а кислород приводит к уменьшению содержания всех полисульфидных соединений как циклического, так и линейного строения.

Механизм процесса заключается в радикально-цепных превращениях, образующихся в БР атомарных водорода, кислорода, SH и алкильных радикалов с образованием полисульфидных соединений различного строения.

Предлагаемый метод перспективен как для очистки метана и биогаза от сероводорода, так и в качестве способа подготовки углеводородного сырья для его последующей каталитической переработки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fridman A. Plasma chemistry. – New York: Cambridge University Press, 2008. – 978 p.
2. Dissociation of  $\text{H}_2\text{S}$  in non-equilibrium gliding arc 'tornado' discharge / T. Nunnally, K. Gutsol, A. Rabinovich, A. Fridman, A. Starikovskiy, A. Gutsol, R.W. Potter // International journal of hydrogen energy. – 2009. – V. 34. – № 18. – P. 7618–7625.
3. Dalaine V., Cormier J.M., Lefaucheur P. A gliding discharge applied to  $\text{H}_2\text{S}$  destruction // Journal of applied physics. – 1998. – V. 83. – № 5. – P. 2435–2441.
4. Gutsol K.A. Plasma dissociation of hydrogen sulfide // iDEA: Drexel E-repository and archives. 2012. URL: <http://idea.library.drexel.edu/islandora/object/idea%3A4035> (дата обращения: 14.11.2015).
5. Plasma assisted dissociation of hydrogen sulfide / K. Gutsol, T. Nunnally, A. Rabinovich, A. Fridman, A. Starikovskiy, A. Gutsol, A. Kemoun // International journal of hydrogen energy. – 2012. – V. 37. – № 2. – P. 1335–1347.
6. Study of plasmachemical oxidation process energized by pulsed barrier discharge with water counter flow / V.A. Abolentsev, A.A. Fridman, S.V. Korobtsev, D.D. Medvedev, B.V. Potapkin, V.D. Rusanov, V.L. Shiryaevskiy // International Symposium on Plasma Chemistry ISPC-11. – Loughborough, UK, August 22–27, 1993. – P. 621–626.
7. Traus I., Suhr H. Hydrogen Sulfide Dissociation in Ozonizer Discharges and Operation of Ozonizers at Elevated Temperatures // Plasma chemistry and plasma processing. – 1992. – V. 12. – № 3. – P. 275–285.
8. Energy efficiency in hydrogen sulfide removal by non-thermal plasma photolysis technique at atmospheric pressure / L. Huang, L. Xia, W. Dong, H. Hou // Chemical engineering journal. – 2013. – V. 228. – P. 1066–1073.
9. Energy efficiency of hydrogen sulfide decomposition in a pulsed corona discharge reactor / S. John, J.C. Hamann, S.S. Muknahalipatna, S. Legowski, J.F. Ackerman, M.D. Argyle // Chemical engineering science. – 2009. – V. 64. – № 23. – P. 4826–4834.
10. Jarrige J., Vervisch P. Decomposition of gaseous sulfide compounds in air by pulsed corona discharge // Plasma chemistry and plasma processing. – 2007. – V. 27. – № 3. – P. 241–255.
11. Simultaneous dry reforming and desulfurization of biomethane with non-equilibrium electric discharge at ambient temperature / Y. Sekine, J. Yamadera, M. Matsukata, E. Kikuchi // Chemical engineering science. – 2010. – V. 65. – № 1. – P. 487–491.
12. Removal of hydrogen sulfide from methane in a barrier discharge / S.V. Kudryashov, A.Yu. Ryabov, A.N. Ocheredko, K.B. Krivtsova, G.S. Shchyogoleva // Plasma chemistry and plasma processing. – 2014. DOI: 10.1007/s11090-014-9590-9.
13. Очистка метана от сероводорода в барьерном разряде / С.В. Кудряшов, А.Н. Очерedyкo, А.Ю. Рябов, К.Б. Кривцова, Г.С. Шеголева // Химия высоких энергий. – 2014. – Т. 48. – № 6. – С. 491–495.
14. Budzianowski W.M. A review of potential innovations for production, conditioning and utilization of biogas with multiple-criteria assessment // Renewable and sustainable energy reviews. – 2016. – V. 54. – P. 1148–1171.
15. Verma P., Samanta S.K. Overview of biogas reforming technologies for hydrogen production: advantages and challenges // Proc. of the First International Conference on Recent Advances in Bioenergy Research. – India: Springer, 2016. – P. 227–243.
16. Robertson J. Diamond-like amorphous carbon // Materials science and engineering: R: Reports. – 2002. – V. 37. – P. 129–281.
17. An updated overview of diamond-like carbon coating in tribology / A.H. Al Mahmud, M.A. Kalam, H.H. Masjuki, H.M. Mobarak, N.W.M. Zulkifli // Critical reviews in solid state and materials sciences. – 2015. – V. 40. – P. 90–118.
18. Formation of ordered polymer patterns from benzene vapor in a barrier discharge / S. Kudryashov, A. Ryabov, G. Shchyogoleva, L. Tsyro // Plasma Sources Science and Technology. – 2014. – V. 23. – № 5. – P. 054001.
19. Hagelaar G.J.M., Pitchford L.C. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models // Plasma Sources Science and Technology. – 2005. – V. 14. – № 4. – P. 722–733.
20. Morgan database. Compilation of electron cross sections used by Kinema Research Software. URL: [www.lxcat.net/Morgan](http://www.lxcat.net/Morgan) (дата обращения 20 декабря 2015).
21. Electronic excitation cross sections of  $\text{H}_2\text{S}$  by electron impact / S.E. Michelin, T. Kroin, M.-T. Lee, L.E. Machado // Journal of physics B. Atomic molecular and optic physics. – 1997. – V. 30. – № 8. – P. 2001–2009.
22. Electron-impact cross sections for ionization and excitation database. URL: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Ionization/molTable.html> (дата обращения: 20.12.2015).
23. Szymtkowski C., P. Mozejko., A. Krzysztofowicz. Measurements of absolute total cross sections for electron scattering from triatomic polar molecules:  $\text{SO}_2$  and  $\text{H}_2\text{S}$  // Radiation physics and chemistry. – 2003. – V. 68. – № 1–2. – P. 307–311.

24. Cross sections for elastic electron–hydrogen sulfide collisions in the low- and intermediate-energy range / P. Rawat, I. Iga, M.-T. Lee, L. Brescansin, M. Homem, L. Machado // *Physical review A*. – 2003. – V. 68. – № 5. – P. 052711.
25. Rao M.V.V.S., Srivastava S.K. Electron impact ionization and attachment cross sections for H<sub>2</sub>S // *Journal of geophysical research*. – 1993. – V. 98. – № E7. – P. 13137–13145.
26. Continetti R., Balko B., Lee Y. Photodissociation of H<sub>2</sub>S and the HS radical at 193.3 nm // *Chemical physics letters*. – 1991. – V. 182. – № 5. – P. 400–405.
27. Dixon R.N., Marston C.C., Balint-Kurti G.G. Photodissociation dynamics and emission spectroscopy of H<sub>2</sub>S in its first absorption band: a time dependent quantum mechanical study // *Journal of chemical physics*. – 1990. – V. 93. – № 9. – P. 6520–6534.
28. A study of the S (<sup>2</sup>P<sub>2,1,0</sub>; <sup>1</sup>D<sub>2</sub>) production in the 193 nm photodissociation of HS and H<sub>2</sub>S / C.-W. Hsu, C.-L. Liao, Z.-X. Ma, P.J.H. Tjossem, C.Y. Ng // *Chemical physics letters*. – 1992. – V. 199. – № 1–2. – P. 78–84.
29. Photodissociation dynamics of H<sub>2</sub>S at 266 nm via the degenerate four-wave mixing spectroscopy / D.-C. Kim, J.W. Hahn, E.S. Lee, K.-H. Jung // *Chemical physics letters*. – 1997. – V. 265. – № 6. – P. 573–578.
30. Photodissociation dynamics of H<sub>2</sub>S (D<sub>2</sub>S) following excitation within its first absorption continuum / X. Xie, L. Schnieder, H. Wallmeier, R. Boettner, K.H. Welge, M.N.R. Ashfold // *Journal of chemical physics*. – 1990. – V. 92. – № 3. – P. 1608–1616.
31. Janev R., Reiter D. Collision processes of hydrocarbon species in hydrogen plasmas: I. The methane family // *Berichte des Forschungszentrums Jülich* 3966. – 2002. URL: <http://hdl.handle.net/2128/243> (дата обращения: 9.11.2015).
32. Evaluated kinetic data for combustion modelling / D.L. Baulch, C.J. Cobos, R.A. Cox, C. Esser, P. Frank, T. Just, J.A. Kerr, M.J. Pilling, J. Troe, R.W. Walker, J. Warnatz // *Journal of physical chemistry reference data*. – 1992. – V. 21. – № 3. – P. 411–734.
33. Braun W., McNesby J.R., Bass A.M. Flash photolysis of methane in the vacuum ultraviolet. II. Absolute rate constants for reactions of CH with methane, hydrogen, and nitrogen // *Journal of chemical physics*. – 1967. – V. 46. – № 6. – P. 2071–2080.
34. Halberstadt M.L., Crump J. Insertion of methylene into the carbon-hydrogen bonds of the C1 to C4 alkanes // *Journal of photochemistry*. – 1972. – V. 1. – № 4. – P. 295–305.
35. Schofield K. Evaluated chemical kinetic rate constants for various gas phase reactions // *Journal of physical chemistry reference data*. – 1973. – V. 2. – № 1. – P. 25–84.
36. Fair R.W., Thrush B.A. Mechanism of S<sub>2</sub> chemiluminescence in the reaction of hydrogen atoms with hydrogen sulphide // *Transactions of the Faraday society*. – 1969. – V. 65. – P. 1208–1218.
37. Radiative transfer of a molecular S<sub>2</sub> B–X spectrum using semiclassical and quantum-mechanical radiation coefficients / H. Van Der Heijden, J. Van Der Mullen, J. Baier, A. Korber // *Journal of physics. B – Atomic molecular and optic physics*. – 2002. – V. 35. – № 17. – P. 3633–3654.
38. Spectroscopy and reaction kinetics of HS radicals / J. Tiee, F. Wampler, R. Oldenborg, W. Rice // *Chemical physics letters*. – 1981. – V. 82. – № 1. – P. 80–84.
39. Evaluated kinetic and photochemical data for atmospheric chemistry: supplement III / R. Atkinson, D.L. Baulch, R.A. Cox, R.F. Hampson Jr., J.A. Kerr, J. Troe // *Journal of physical chemistry reference data*. – 1989. – V. 18. – № 3. – P. 881–1097.
40. Tsang W. Chemical kinetic data base for combustion chemistry. P. 3: propane // *Journal of physical chemistry reference data*. – 1988. – V. 17. – № 2. – P. 887–951.
41. Evaluated kinetic and photochemical data for atmospheric chemistry: V. I – gas phase reactions of Ox, HOx, NOx and SOx species / R. Atkinson, D.L. Baulch, R.A. Cox, J.N. Crowley, R.F. Hampson, R.G. Hynes, M.E. Jenkin, M.J. Rossi, J. Troe // *Atmospheric chemistry and physics*. – 2004. – V. 4. – № 6. – P. 1461–1738.
42. Evaluated kinetic, photochemical and heterogeneous data for atmospheric chemistry: supplement V, IUPAC subcommittee on gas kinetic data evaluation for atmospheric chemistry / R. Atkinson, D.L. Baulch, R.A. Cox, R.F. Hampson Jr., J.A. Ker, M.J. Rossi, J. Troe // *Journal of physical chemistry reference data*. – 1997. – V. 26. – P. 521–1011.
43. Mousavipour S.H., Namdar-Ghanbari M.A., Sadeghian L.A. A Theoretical study on the kinetics of hydrogen abstraction reactions of methyl or hydroxyl radicals with hydrogen sulfide // *Journal of physical chemistry A*. – 2003. – V. 107. – № 19. – P. 3752–3758.
44. Goumri A., Rocha J.-D.R., Marshall P. Kinetics of the recombination reaction SH + O<sub>2</sub> + Ar: implications for the formation and loss of HSOO and SOO in the atmosphere // *Journal of physical chemistry*. – 1995. – V. 99. – P. 10834–10836.
45. Shum L.G.S., Benson S.W. The pyrolysis of dimethyl sulfide, kinetics and mechanism // *International journal of chemical kinetics*. – 1985. – V. 17. – № 7. – P. 749–761.

Поступила 28.06.2016 г.

#### Информация об авторах

**Кудряшов С.В.**, кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

**Рябов А.Ю.**, кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

**Очеретько А.Н.**, младший научный сотрудник Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

## OXIDATIVE PLASMA CHEMICAL CONVERSION OF H<sub>2</sub>S IN GASEOUS HYDROCARBONS ATMOSPHERE IN THE PRESENCE OF O<sub>2</sub> AND CO<sub>2</sub>

Sergey V. Kudryashov<sup>1</sup>,  
ks@ipc.tsc.ru

Andrey Y. Ryabov<sup>1</sup>,  
andrey@ipc.tsc.ru

Andrey N. Ocheredko<sup>1</sup>,  
andrew@ipc.tsc.ru

<sup>1</sup> Institute of Petroleum Chemistry Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
4, Academicheskoy Avenue, Tomsk, 634055, Russia.

The relevance of the discussed issue is caused by the need to elaborate hydrogen sulfide removal methods from hydrocarbon gases for their preparation for treatment and transportation on oil or gas fields.

**The main aim** of the study is to investigate the regularities of hydrogen sulfide removal from methane and liquid petroleum gases with oxygen and carbon dioxide additions in the barrier discharge plasma reactor with one or two high voltage electrode.

**The methods used in the study:** gas chromatography, gas chromatography-mass spectrometry, IR-spectroscopy, elemental analysis.

**The main results.** The authors have studied the regularities of plasma chemical conversion of hydrogen sulfide in mixtures with methane and liquid petroleum gases with O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> additions. It is ascertained that the main gaseous reaction products are hydrogen, C<sub>2+</sub> hydrocarbons, carbon mono- and dioxide, and methanethiol (there are no methanethiol in the case of CO<sub>2</sub>), polymeric deposit is formed on electrode surface. In the case of methane the hydrogen sulfide conversion dependence on oxygen concentration is extreme. Oxygen additions to the liquid petroleum gases–H<sub>2</sub>S mixtures tend to hydrogen sulfide conversion decrease. CO<sub>2</sub> additions to the H<sub>2</sub>S mix with both methane and liquid petroleum gases tend to increase of the hydrogen sulfide conversion. The power consumptions of H<sub>2</sub>S cleanup process of methane blends is less than the one with O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> additions. In the case of liquid petroleum gases O<sub>2</sub> additions increase the power consumption of the process and CO<sub>2</sub> additions decrease the power consumption of the process. The composition of a deposit which is polymeric stuff on electrode area is investigated. Linear and cyclic polysulfides as well as sulfones are found out in the deposit structure. The authors studied the kinetic regularities of plasma chemical conversion of hydrogen sulfide in mixtures with methane and liquid petroleum gases with O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> additions. A probable reaction mechanism is proposed based on the literature and experimental data as well as theoretical estimates. The mechanism consists of two composing studies. The first is the initiation of hydrocarbons and H<sub>2</sub>S molecules by the barrier discharge electron with formation of hydrogen and oxygen atoms, SH and alkyl radicals. The next study is the chain reaction of radicals which was formed by the previous step to obtaining polysulfidic compounds with alkyl and oxygen end groups.

### Key words:

Plasma chemical conversion, hydrogen sulfide, gaseous alkanes, methane, liquid petroleum gases, oxygen, carbon dioxide, barrier discharge.

### REFERENCES

1. Fridman A. *Plasma chemistry*. New York, Cambridge University Press, 2008. 978 p.
2. Nunnally T., Gutsol K., Rabinovich A., Fridman A., Starikovskiy A., Gutsol A., Potter R.W. Dissociation of H<sub>2</sub>S in non-equilibrium gliding arc 'tornado' discharge. *International journal of hydrogen energy*, 2009, vol. 34, no. 18, pp. 7618–7625.
3. Dalaine V., Cormier J.M., Lefaucheur P. A gliding discharge applied to H<sub>2</sub>S destruction. *Journal of applied physics*, 1998, vol. 83, no. 5, pp. 2435–2441.
4. Gutsol K.A. Plasma dissociation of hydrogen sulfide. *iDEA: Drexel E-repository and archives*, 2012. Available at: <https://idea.library.drexel.edu/islandora/object/idea%3A4035> (accessed 21 December 2015).
5. Gutsol K., Nunnally T., Rabinovich A., Fridman A., Starikovskiy A., Gutsol A., Kemoun A. Plasma assisted dissociation of hydrogen sulfide. *International journal of hydrogen energy*, 2012, vol. 37, no. 2, pp. 1335–1347.
6. Abolentsev V.A., Fridman A.A., Korobtsev S.V., Medvedev D.D., Potapkin B.V., Rusanov V.D., Shiryayevskiy V.L. Study of plasmochemical oxidation process energized by pulsed barrier discharge with water counter flow. *International Symposium on Plasma Chemistry ISPC-11*. Loughborough, August 22–27, 1993. pp. 621–626.
7. Traus I., Suhr H. Hydrogen sulfide dissociation in ozonizer discharges and operation of ozonizers at elevated temperatures. *Plasma chemistry and plasma processing*, 1992, vol. 12, no. 3, pp. 275–285.
8. Huang L., Xia L., Dong W., Hou H. Energy efficiency in hydrogen sulfide removal by non-thermal plasma photolysis technique at atmospheric pressure. *Chemical engineering journal*, 2013, vol. 228, pp. 1066–1073.
9. John S., Hamann J.C., Muknahallipatna S.S., Legowski S., Ackerman J.F., Argyle M.D. Energy efficiency of hydrogen sulfide decomposition in a pulsed corona discharge reactor. *Chemical engineering science*, 2009, vol. 64, no. 23, pp. 4826–4834.
10. Jarrige J., Vervisch P. Decomposition of gaseous sulfide compounds in air by pulsed corona discharge. *Plasma chemistry and plasma processing*, 2007, vol. 27, no. 3, pp. 241–255.
11. Sekine Y., Yamadera J., Matsukata M., Kikuchi E. Simultaneous dry reforming and desulfurization of biomethane with non-equilibrium electric discharge at ambient temperature. *Chemical engineering science*, 2010, vol. 65, no. 1, pp. 487–491.
12. Kudryashov S.V., Ryabov A.Yu., Ocheredko A.N., Krivtsova K.B., Shchyogoleva G.S. Removal of hydrogen sulfide from methane in a barrier discharge. *Plasma chemistry and plasma processing*, 2015, vol. 35, pp. 201–215.
13. Kudryashov S.V., Ocheredko A.N., Ryabov A.Yu., Krivtsova K.B., Shchyogoleva G.S. Methane cleaning from hydrogen sulfide in the barrier discharge. *Khimiya vysokikh energy*, 2014, vol. 48, no. 6, pp. 491–495. In Rus.
14. Budzianowski W.M. A review of potential innovations for production, conditioning and utilization of biogas with multiple-criteria assessment. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2016, vol. 54, pp. 1148–1171.

15. Verma P., Samanta S.K. Overview of biogas reforming technologies for hydrogen production: advantages and challenges. *Proceedings of the First International Conference on Recent Advances in Bioenergy Research*. India, Springer, 2016. pp. 227–243.
16. Robertson J. Diamond-like amorphous carbon. *Materials science and engineering: R: Reports*, 2002, vol. 37, pp. 129–281.
17. Mahmud A.H. Al, Kalam M.A., Masjuki H.H., Mobarak H.M., Zulkifli N.W.M. An updated overview of diamond-like carbon coating in tribology. *Critical reviews in solid state and materials sciences*, 2015, vol. 40, pp. 90–118.
18. Kudryashov S., Ryabov A., Shchyogoleva G., Tsyro L. Formation of ordered polymer patterns from benzene vapor in a barrier discharge. *Plasma sources science and technology*, 2014, vol. 23, no 5, pp. 054001.
19. Hagelaar G.J.M., Pitchford L.C. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models. *Plasma Sources Science and Technology*, 2005, vol. 14, no. 4, pp. 722–733.
20. *Morgan database. Compilation of electron cross sections used by Kinema Research Software*. Available at: [www.lxcat.net/Morgan](http://www.lxcat.net/Morgan) (accessed 11 December 2015).
21. Michelin S.E., Kroin T., Lee M.-T., Machado L.E. Electronic excitation cross sections of H<sub>2</sub>S by electron impact. *Journal of physics B. Atomic molecular and optic physics*, 1997, vol. 30, no. 8, pp. 2001–2009.
22. *Electron-impact cross sections for ionization and excitation database*. Available at: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Ionization/molTable.html> (accessed 20 December 2015).
23. Szmytkowski C., Możejko P.P., Krzysztofowicz A. Measurements of absolute total cross sections for electron scattering from triatomic polar molecules: SO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S. *Radiation physics and chemistry*, 2003, vol. 68, no. 1–2, pp. 307–311.
24. Rawat P.P., Iga I., Lee M.-T., Brescansin L., Homem M., Machado L. Cross sections for elastic electron–hydrogen sulfide collisions in the low- and intermediate-energy range. *Physical review A*, 2003, vol. 68, no. 5, pp. 052711.
25. Rao M.V.V.S., Srivastava S.K. Electron impact ionization and attachment cross sections for H<sub>2</sub>S. *Journal of geophysical research*, 1993, vol. 98, no. E7, pp. 13137–13145.
26. Continetti R., Balko B., Lee Y. Photodissociation of H<sub>2</sub>S and the HS radical at 193.3 nm. *Chemical physics letters*, 1991, vol. 182, no. 5, pp. 400–405.
27. Dixon R.N., Marston C.C., Balint-Kurti G.G. Photodissociation dynamics and emission spectroscopy of H<sub>2</sub>S in its first absorption band: A time dependent quantum mechanical study. *Journal of chemical physics*, 1990, vol. 93, no. 9, pp. 6520–6534.
28. Hsu C.-W., Liao C.-L., Ma Z.-X., Tjossem P.J.H., Ng C.Y. A study of the S(<sup>2</sup>P<sub>21,0</sub><sup>1</sup>D<sub>2</sub>) production in the 193 nm photodissociation of HS and H<sub>2</sub>S. *Chemical physics letters*, 1992, vol. 199, no. 1–2, pp. 78–84.
29. Kim D.-C., Hahn J.W., Lee E.S., Jung K.-H. Photodissociation dynamics of H<sub>2</sub>S at 266 nm via the degenerate four-wave mixing spectroscopy. *Chemical physics letters*, 1997, vol. 265, no. 6, pp. 573–578.
30. Xie X., Schnieder L., Wallmeier H., Boettner R., Welge K.H., Ashfold M.N.R. Photodissociation dynamics of H<sub>2</sub>S (D<sub>2</sub>S) following excitation within its first absorption continuum. *Journal of chemical physics*, 1990, vol. 92, no. 3, pp. 1608–1616.
31. Janev R., Reiter D. Collision processes of hydrocarbon species in hydrogen plasmas: I. The methane family *Berichte des Forschungszentrums Jülich 3966*, 2002. Available at: <http://hdl.handle.net/2128/243> (accessed 9 November 2015).
32. Baulch D.L., Cobos C.J., Cox R.A., Esser C., Frank P., Just T., Kerr J.A., Pilling M.J., Troe J., Walker R.W., Warnatz J. Evaluated kinetic data for combustion modeling. *Journal of physical chemistry reference data*, 1992, vol. 21, no. 3, pp. 411–734.
33. Braun W., McNesby J.R., Bass A.M. Flash photolysis of methane in the vacuum ultraviolet. II. Absolute rate constants for reactions of CH with methane, hydrogen, and nitrogen. *Journal of chemical physics*, 1967, vol. 46, no. 6, pp. 2071–2080.
34. Halberstadt M.L., Crump J. Insertion of methylene into the carbon–hydrogen bonds of the C1 to C4 alkanes. *Journal of photochemistry*, 1972, vol. 1, no. 4, pp. 295–305.
35. Schofield K. Evaluated chemical kinetic rate constants for various gas phase reactions. *Journal of physical chemistry reference data*, 1973, vol. 2, no. 1, pp. 25–84.
36. Fair R.W., Thrush B.A. Mechanism of S<sub>2</sub> chemiluminescence in the reaction of hydrogen atoms with hydrogen sulphide. *Transactions of the Faraday society*, 1969, vol. 65, pp. 1208–1218.
37. Van Der Heijden H., Van Der Mullen J., Baier J., Korber A. Radiative transfer of a molecular S<sub>2</sub> B–X spectrum using semiclassical and quantum–mechanical radiation coefficients. *Journal of physics. B – Atomic molecular and optic physics*, 2002, vol. 35, no. 17, pp. 3633–3654.
38. Tee J., Wampler F., Oldenberg R., Rice W. Spectroscopy and reaction kinetics of HS radicals. *Chemical physics letters*, 1981, vol. 82, no. 1, pp. 80–84.
39. Atkinson R., Baulch D.L., Cox R.A., Hampson Jr. R.F., Kerr J.A., Troe J. Evaluated kinetic and photochemical data for atmospheric chemistry: supplement III. *Journal of physical chemistry reference data*, 1989, vol. 18, no. 3, pp. 881–1097.
40. Tsang W. Chemical kinetic data base for combustion chemistry. P. 3: propane. *Journal of physical chemistry reference data*, 1988, vol. 17, no. 2, pp. 887–951.
41. Atkinson R., Baulch D.L., Cox R.A., Crowley J.N., Hampson Jr. R.F., Hynes R.G., Jenkin M.E., Rossi M.J., Troe J. Evaluated kinetic and photochemical data for atmospheric chemistry: Vol. I Gas phase reactions of Ox, HOx, NOx and SOx species. *Atmospheric chemistry and physics*, 2004, vol. 4, no. 6, pp. 1461–1738.
42. Atkinson R., Baulch D.L., Cox R.A., Hampson Jr. R.F., Kerr J.A., Rossi M.J., Troe J. Evaluated kinetic, photochemical and heterogeneous data for atmospheric chemistry: supplement V, IUPAC subcommittee on gas kinetic data evaluation for atmospheric chemistry. *Journal of physical chemistry reference data*, 1997, vol. 26, pp. 521–1011.
43. Mousavipour S.H., Namdar-Ghanbari M.A., Sadeghian L.A. A theoretical study on the kinetics of hydrogen abstraction reactions of methyl or hydroxyl radicals with hydrogen sulfide. *Journal of physical chemistry A*, 2003, vol. 107, no. 19, pp. 3752–3758.
44. Goumri A., Rocha J.-D.R., Marshall P. Kinetics of the recombination reaction SH + O<sub>2</sub> + Ar: implications for the formation and loss of HSOO and SOO in the atmosphere. *Journal of physical chemistry*, 1995, vol. 99, pp. 10834–10836.
45. Shum L.G.S., Benson S.W. The pyrolysis of dimethyl sulfide, kinetics and mechanism. *International journal of chemical kinetics*, 1985, vol. 17, no. 7, pp. 749–761.

Received: 28 June 2016.

#### Information about the authors

**Sergey V. Kudryashov**, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Petroleum Chemistry Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Andrey Y. Ryabov**, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Petroleum Chemistry Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Andrey N. Ocheredko**, junior researcher Institute of Petroleum Chemistry Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 631.474

## АНТРОПОГЕННЫЕ ПОЧВЫ НА ЛЕСНЫХ ЗЕМЛЯХ САНИТАРНО-ЗАЩИТНОЙ ЗОНЫ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СВЕРХВЫСОКОГО КЛАССА НАПРЯЖЕНИЯ

Захарченко Александр Викторович<sup>1</sup>,  
zakh@tpu.ru

Пасько Ольга Анатольевна<sup>1</sup>,  
oap@sibmail.com

Ипатова Дарья Витальевна<sup>1</sup>,  
ipatovadasha@gmail.com

Раудина Татьяна Валериевна<sup>2</sup>,  
tanya\_raud@mail.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, ул. Ленина, 30.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

**Актуальность.** Антропогенные почвы, потерявшие свой природный статус, являются малоизученными объектами. На лесных землях под воздушной линией электропередачи сверхвысокого напряжения в санитарно-защитной зоне установлены факты деградации почв, не учитываемые при проектировании объектов. Она в большинстве случаев вызвана раскорчевкой древесной растительности. Учитывая значительную протяженность на лесных землях линий электропередачи этого класса напряжения, воздействие носит глобальный характер.

**Цель работы:** диагностика почв и картографирование почвенного покрова на землях санитарно-защитной зоны под линией электропередачи, образованных на лесных территориях для оценки деградации земель при строительстве и эксплуатации объектов энергетики.

**Объекты и методы исследования.** Объектом исследования является техногенный нарушенный почвенный покров санитарно-защитной зоны линии электропередачи. Объем выборки – 320 нарушенных участков. Используются непараметрические виды анализа на основе пакета STATISTICA.

**Результаты.** Проведен анализ биоразнообразия почв и определена степень деградации земель в санитарно-защитной зоне. Рассмотрены пространственные характеристики участков антропогенных почв.

**Выводы.** Антропогенное воздействие на земли санитарно-защитной зоны приводит к созданию различных по масштабу, возрасту и происхождению деградаций почвенного покрова. Показано, что распределение площадей нарушенных участков подчиняется степенному закону. Выделено 4 основных типа антропогенных почв санитарно-защитной зоны насыпные почвы (стратоземы и стратолиты) – 2,2 %, резектозем 1 – 3,9 % и резектозем 2 – 11 % текстурно-дифференцированных дерново-подзолистых почв, абразом – 10 %. Площади антропогенно-измененных почв нарушенного сложения составляют 27,5 % от изученной площади. Степень деградации почв оценивается в 3 балла из 5. При строительстве образуются нарушения почв более обширные и более разнообразные по форме (при  $p > 0,95$ ), чем за период эксплуатации. Сравнение распределения случайных величин площадей участков по типам антропогенных почв показывает, что существуют достоверные различия между абраземами и резектоземами 2 ( $p > 0,95$ ). По фактору формы насыпные почвы достоверно более округлые ( $p > 0,95$ ), чем участки абраземов. Почвенный покров имеет высокую степень деградации и нуждается в рекультивации.

### Ключевые слова:

Антропогенные почвы, дерново-подзолистые со вторым гумусовым горизонтом, деградированные земли, биоразнообразие почв, санитарно-защитная зона, воздушные линии электропередачи.

### Введение

Современной наукой признается, что деградация земель и опустынивание являются двигателем климатических изменений [1, 2]. Линии электропередачи, включая подстанции, относятся к объектам, слабо загрязняющим химическими веществами окружающую среду, поэтому их причисляют к «мягко» влияющему техническому объекту, хотя и отмечаются многоплановые негативные воздействия на природу [3]. С другой стороны, при строительстве воздушной линии электропередачи сверхвысокого напряжения (ВЛ СВН) на лесных землях в санитарно-защитной зоне (СЗЗ) установлены факты деградации почв [4], не учитываемые проекти-

ровщиками объектов энергетики. Она вызвана технологическими операциями с участием тяжелой техники: рубка, трелевка, транспортировка древесины. Многочисленные пятна почв с отсутствием верхней части профиля образуются при корчевании пней, которое исключено из нормативных документов на данный момент, но широко употреблялось при прокладке просеки под ВЛ СВН в 20 веке.

Целью работы является диагностика и картографирование антропогенных нарушений почвенного покрова бореальных лесов на землях санитарно-защитной зоны при строительстве и эксплуатации линий электропередачи сверхвысокого напряжения, имеющих возраст более 30 лет.

В российской классификации почв [5] достаточно много внимания уделено антропогенно-преобразованным почвам. В зарубежной научной литературе антропогенно-преобразованные почвы (man-made soil) – это почвы, потерявшие свой природный статус [6, 7]. Любые почвы, подвергшиеся воздействию человека, частично сохранившие свой природный статус после единичного механического или химического воздействия, относят к антропогенно-измененным почвам. Фонд таких почв постоянно накапливается, потому что естественное восстановление таких почв протекает за период более 30 лет. Все эти почвы, частично утратившие плодородие, являются малоизученными объектами на сегодняшний день. Ситуация осложняется тем, что территории, находящиеся в санитарно-защитной зоне, под влиянием производства подвергаются воздействию специфических факторов антропогенной природы, которые придают дополнительное направление развитию почвенного покрова, иногда вызывая образование почв, ранее в природе не существовавших. Под воздушными линиями электропередачи после сведения леса формируются специфические экологические условия [8]. Например, во избежание токов утечки в СЗЗ деревья или кусты вырубаются. Поддержание на бывшей лесной территории луговой растительности является экологическим фактором, влияющим на морфологию почвы всей СЗЗ [9].

#### Объекты и методы

Объектом исследования является техногенный нарушенный почвенный покров СЗЗ ВЛ СВН. Проведена полевая почвенная съемка техногенных нарушений сложения почв, охватывающая расстояние 750 м, захватывающая два пролета между тремя опорами при ширине просеки 60–70 м. Исследования проведены вблизи с. Ломачевка Кемеровской области (градусы северной широты – 56,14, градусы восточной долготы – 86,84). Линия электропередачи ВЛ-500 кВ ПС «Итатская» – ПС «Ново-Анжерская» № 524 (кадастровый номер СЗЗ – 42.00.2.41) запущена в эксплуатацию в 1967 г. (рис. 1).

Земля под ВЛ СВН находится в санитарной зоне отчуждения и ограничено используется фермерами для проезда, выпаса домашнего скота и сенокосения. Географически площадка исследования располагается на макросклоне Арчакского кряжа юго-восточной экспозиции. Абсолютные высотные отметки водораздела кряжа увеличиваются с запада на восток. В районе исследований они изменяются в интервале от 180 до 220 м над уровнем моря. Относительная высота кряжа в данном районе достигает 100 м.

На территории СЗЗ текстурно-дифференцированные дерново-подзолистые почвы (umbric albeluvisols, WRB, 2006) имеют морфологическую особенность в виде серых пятен или полосы в нижней части элювиального горизонта (второй гумусовый горизонт). Территория СЗЗ является неоднородной по составу естественных и антропогенных почв [9].

Морфологическое строение, химические и физические свойства этих почв достаточно подробно изучены [10]. Дерново-подзолистые почвы азональны, и в виде полосы окаймляют Арчакский кряж, располагаясь на пологой средней части склона. Зональными почвами считаются обычные черноземы, темно серые и серые лесные почвы.

Растительный покров СЗЗ имеет мозаичный характер, что определяется комплексом как антропогенных, так и естественных микроценозов [11]. На ненарушенных или слабонарушенных участках просеки уменьшается обилие видов лесного разнотравья и увеличивается участие лесо-луговых и луговых видов. Возрастание обилия луговых видов сопровождается увеличением, как проективного покрытия, так и высоты вегетативных побегов.

Выбор данного участка в качестве ключевого обусловлен характерными свойствами для лесной территории Западной Сибири – ровным, слабонаклонным рельефом, смешанным берёзово-осиновососновым лесом, луговой травянистой растительностью, благоприятными климатическими условиями, дерново-подзолистыми почвами, характерными для южной тайги. Морфология этих почв позволяет легко диагностировать степень нарушения их профиля по присутствию или отсутствию осветленного элювиального горизонта. Частично срезан гумусовый горизонт, но сохраняется элювиальной – слабонарушенная почва. Если срезан гумусовый горизонт полностью и частично элювиальный, то такие почвы отнесены к средненарушенным. Сильнонарушенной считается почва, лишенная гумусового, элювиального и частично или полностью переходного горизонтов.

На основе расчетов иерархической структуры неоднородности почв [12] определена сетка наблюдений антропогенно-измененных почв с 40-метровым расстоянием между узлами. Территория СЗЗ инструментально разбивается на квадраты 40×40 м относительно центрального провода и размечается вешками. Общая ширина СЗЗ составляет 60 м. Квадраты ориентированы относительно проекции центрального провода на землю, поэтому по краям СЗЗ отбиваются полосы 20–40 м в зависимости от положения границы леса или наличия антропогенно-измененных почв за пределами СЗЗ. Отображение границ выявленных почвенных выделов проведено в масштабе 1:1000.

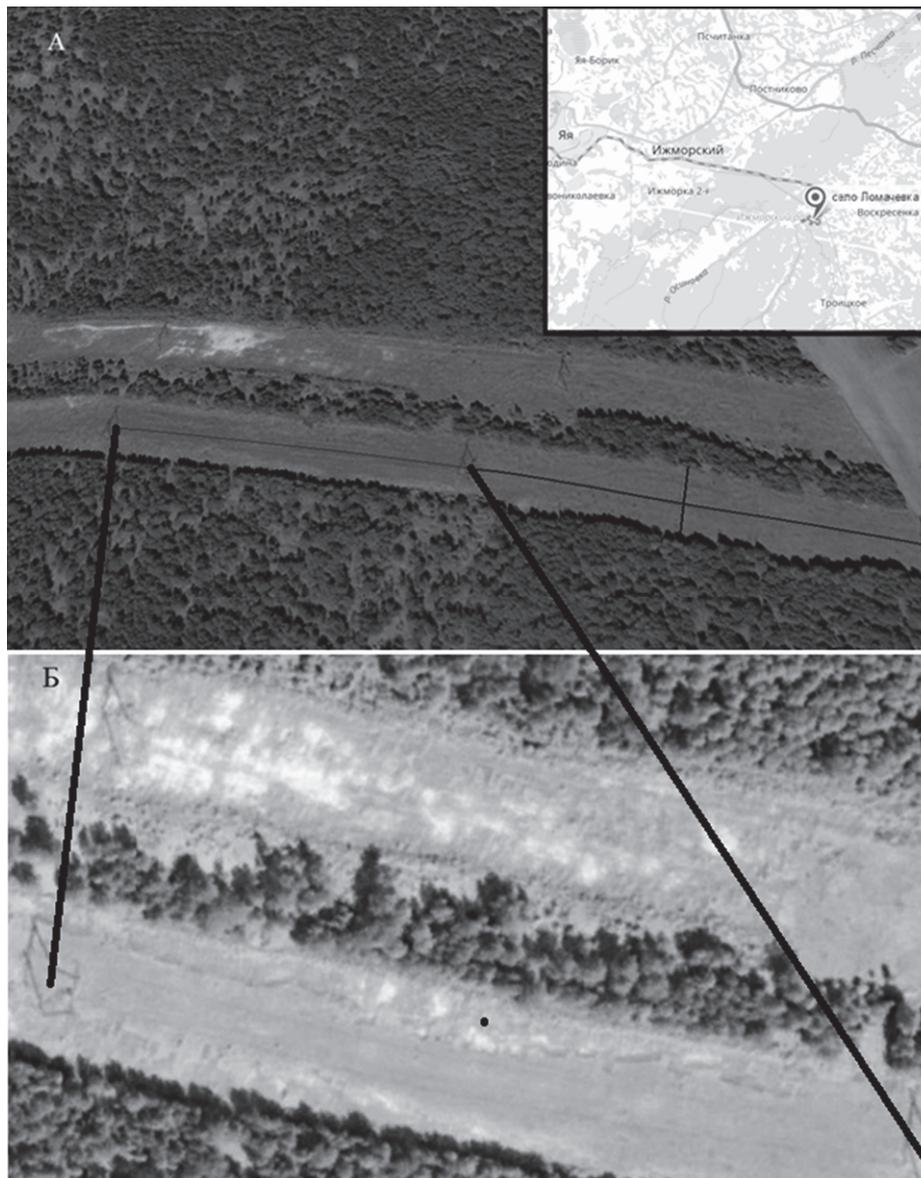
Для картографирования сложного по форме контура нарушения или наличия множества мелких рытвин изучаемый квадрат дробится на части. Для разметки территории используются буссоль и металлическая мерная лента (40 м). Внутри квадрата описывается морфологическое строение почв нарушенного сложения. Визуально оценивается площадной процент присутствия диагностированных типов/подтипов антропогенно-нарушенных почв в общем контуре. Название контура и оценка степени нарушенности почв внутри контура определяется по преобладающему типу/подтипу антропогенной почвы.

При строительстве ВЛ СВН в 1986 г., расположенной параллельно в одном коридоре с изученной воздушной линией, построенной в 1967 г., проведена чистка СЗЗ от древесной растительности. Участки, подвергшиеся воздействию, нанесены на карту. В соответствии с правилами эксплуатации ВЛ СВН до 1986 г. использовалась рубка древесной растительности, проводимая каждые 3 года. Рубка не вызывает нарушение сложения почв. Поэтому границы контуров антропогенных почв,

не относящиеся к 1986 г., отнесены к моменту строительства объекта – 1967 г. В последующие годы растительность просеки обрабатывается дефолиантами.

Положение выявленных контуров участков антропогенных почв привязано к положению опор ВЛ СВН и нанесено с использованием AUTOCAD на аэрокосмический снимок высокого разрешения.

Для характеристики формы выделенных полигонов используется расчетная переменная величина



**Рис. 1.** А) Положение на местности изученной части СЗЗ ВЛ СВН (снимок 2016 г., опубликован Google®). На вкладке показаны ближайшие населенные пункты. Линиями по центру СЗЗ показана дистанция между опорами (слева направо – 340, 368 м), черной линией – положение траншеи, где измерялись мощности почвенных горизонтов, белесые пятна СЗЗ – деградированные почвы. Б) Белесым цветом отражаются пятна деградации дерново-подзолистых почв между опорами линии электропередачи

**Fig. 1.** А) Localization of the studied part of sanitary protection zone of extra high voltage overhead lines (satellite image was published in 2016, Map Google®). The page inset shows the nearest settlements. The lines in the center of sanitary protection zone are the distance between supports (from left to right – 340, 368 m). The black line is the trench position, where the thickness of soil horizons was measured. The whitish spots of sanitary protection zone are degraded soils. Б) The albescent color reflects the spots sod-podzolic soil degradation between transmission towers

на – фактор формы, которая рассчитывается по формуле

$$F = \frac{4\pi S}{P^2},$$

где  $S$  – площадь объекта;  $P$  – периметр объекта.

Фактор формы позволяет оценить, насколько близкими к форме круга являются границы контуров. В идеале при  $F=1$  форма контура соответствует кругу, для треугольника  $F=0,64$ . Чем более вытянута форма, чем более изрезана граница, тем меньше значение  $F$ .

Каждый контур индексирован и занесен в базу данных. Используются характеристики контура, такие как площадь, периметр, относительные координаты контура, тип (подтип) почвы, степень нарушения, фактор формы. Общее количество проиндексированных контуров почв разной степени нарушения в базе данных составляет  $N = 511$ .

На предварительном этапе анализа случайной величины площади и периметров контуров выявлено, что их распределение имеет ненормальный, а точнее, степенной тип с тяжелым хвостом в направлении максимальных значений. Поэтому для статистической характеристики использованы структурные характеристики и непараметрические виды анализа, такие как  $U$ -критерий Манна–Уитни и критерий Краскела–Уоллиса.

В качестве топографической основы территории СЗЗ использован фрагмент аэрокосмического снимка Google 2016 г., находящийся в свободном доступе. Построение карт и статистическая обработка полученных материалов проведены с помощью AUTOCAD, STATISTICA.

### Результаты и обсуждения

При строительстве и эксплуатации ВЛ СВН (500 кВ) почвы просеки подвергаются воздействию агрегатов и ходовых систем тяжелой техники с формированием антропогенных биогеоценозов [8]. На поверхности почв просеки наблюдаются колеи, пятна с отсутствием гумусового горизонта или его малой мощностью и насыпные слои грунта. С возрастом СЗЗ рытвины выравниваются, покрываются дерном и зарастают травянистой растительностью так, что выделение границ нарушенных участков становится затруднительным. Образовавшиеся эмбриоземы скрывают нарушенные участки, поэтому исследование проводится в весенний период, когда отсутствует травянистая растительность. В это время возможно визуально выявить нарушения сложения почв по характерной форме рельефа.

Неоднородность почвенного покрова СЗЗ линии электропередачи в лесной зоне, складывается из двух вариантов: 1) антропогенного нарушения сложения почв, 2) унаследованного от парцеллярной структуры лесного биоценоза. Первый вариант в структуре почвенного покрова формирует комплексы и мозаики, обусловленные плановыми и случайными компонентами. Первый компо-

нент – это участки под опорами ВЛ СВН и дороги для доставки оборудования и вывоза древесины, место стоянки трактора при подвеске проводов на опоры. Второй компонент – места раскорчевки крупных пней, трелёвки, волочения стволов, складирования нетоварной древесины. Вторым вариантом явно не проявляется, но при детальном обследовании растительности и почв обнаруживаются следы произрастания деревьев на территории СЗЗ, которые возникли до строительства объекта.

В морфологии антропогенных почв выявлен характерный набор нарушений сложения с потерей частей профиля. Классификация антропогенных почв основывается на характере этих нарушений и преобладании диагностированного типа/подтипа почв.

Выделяются следующие типы антропогенных почв на основе классификации почв 2004 г. (табл. 1).

Абраземы – почвы, потерявшие весь или часть своего профиля, но обязательно верхние диагностические горизонты, присутствующие в типе фоновых почв.

Стратолиты – насыпные слои из подстилающих пород, отсутствие погребенных почв.

Стратоземы – почвы с насыпным слоем более 40 см, присутствуют остатки погребенных почв.

Эмбриоземы – молодые почвы, формирующиеся на поверхности антропогенных почв.

Глубина срезания верхнего слоя почвы может быть недостаточной для образования абразема и остаются части верхнего слоя, позволяющие почву отнести к текстурно-дифференцированному отделу. Такие почвы рассматриваются нами как резектоземы в типе естественных почв, в данном случае текстурно-дифференцированных дерново-подзолистых. Следовательно, резектоземы – естественные почвы, у которых частично или полностью срезан верхний, но сохранен диагностический (элювиальный) горизонт. Резектоземы разделены на две подгруппы: слаборазрушенные дерново-подзолистые (резектозем 1) и среднеразрушенные дерново-подзолистые (резектозем 2). Резектозем 1 потерял только часть гумусового горизонта и отличается от фоновых почв отсутствием под дерновым слоем части гумусового горизонта. Мощность гумусового горизонта фоновых почв колеблется в пределах 11–14 см, что больше в 2 раза относительно резектозема 1. Резектозем 2 – это почва, у которой срезан полностью гумусовый горизонт и на поверхности экспонируется элювиальный горизонт.

В плане они случайно разбросаны по территории пятнами, но иногда создают комплексы с абраземами по краю СЗЗ.

Почти во всех антропогенных почвах формируется дерновый горизонт в виде рыхлого слоя, насыщенного корнями травянистых растений, но с отсутствием серой прокраски внутри структурных отделностей (кроме Resectozem 1). Степень нарушения профиля почв положительно коррелирует со степенью деградации.

**Таблица 1.** Таксономическая схема разделов антропогенных почв

**Table 1.** Taxonomic scheme of anthropogenic soils divisions

Таксон Taxon	Деление Division		
Стол Stem	Постлитогенный Postlithogenic	Синлитогенный Synlithogenic	Непочвенное образование Notsoil
Отдел Order	1. Абразем/Abrazem 2. Текстурно-дифференцированные Textural differentiated	Стратозем Stratozem	Стратолит Stratolit
Тип Type	1. Абразем/Abrazem 2. Дерново-подзолистая Sod-podzolic		
Под-тип Subtyp	1. Абразем/ Abrazem 2. Слабонарушенные дерново-подзолистые (резектозем 1) Resectozem 1 gray 3. Средненарушенные дерново-подзолистые (резектозем 2) Resectozem 2 light-gray	1. Стратозем на бурых суглинках Light-Gray stratozem	1. Стратолит буросуглинистый Brown loams stratolit 2. Стратолит на древней коре Old core stratolit

Слабонарушенная дерново-подзолистая почва (Resectozem 1) имеет объемную массу около 1 г/см<sup>3</sup> (табл. 2). Наличие остатков гумусового горизонта и серой окраски структурных отдельностей способствуют их быстрому восстановлению до естественной мощности и сокращению площадей от момента нарушения к моменту проведения наблюдений. Мощность дернового слоя соответствует фоновым почвам – 5–7 см, но под плотной дерниной отсутствует рыхлая часть гумусового горизонта, что наряду с малой мощностью является диагностическим признаком для их выделения в подтип нарушенных почв в полевых условиях. Они занимают небольшую площадь – 0,2 га (2,2 %). После строительства ВЛ СВН этих почв на территории было много, но к моменту проведения почвен-

ной съемки большая их часть была полностью восстановлена естественным способом. Процент от общего количества нарушенных участков (N) составляет 13,5 %, средний размер нарушения – 30 м<sup>2</sup>, встречаемость – 7,2 шт./га. Степень деградации почв – наименьшая (слабонарушенные), что незначительно отражается на мощности травостоя и проективном покрытии растительности.

Насыпные почвы образованы при выемке грунта под опоры, и их присутствие связано с насыпными грунтами. Выделено два подтипа стратолитов: на бурых суглинках и древней коре выветривания, которая залегает под отложениями четвертичных бурых суглинков. Древняя кора выветривания имеет остатки желтоземов и плинтитов, обнаруженных в разрезе под четвертичными суглинками, которые могут образовываться при влажном тропическом климате. Предположительно она имеет верхний олигоценный возраст, так как в это время в Западной Сибири климат соответствовал этим условиям [13]. Однако какие-либо прямые палеонтологические подтверждения этому предположению отсутствуют. На изученном участке располагаются 2 опоры. Под опорой, расположенной выше по склону, стратолиты сформированы из бурых тяжелых суглинков, а в средней части склона стратолиты – из палевых и желтых суглинков древней коры выветривания. Статоземы оконтуривают участки стратолитов под опорами, встречаются также по краю просеки, куда стаскивалась нетоварная древесина. Активно процесс восстановления почв протекает на насыпных грунтах, независимо от материнских пород. Объемная масса дернового слоя эмбриозема насыпных почв составляет 0,82–0,99 г/см<sup>3</sup>. Мощность сформированного гумусового горизонта изменяется в пределах 5–7 см, достигая в отдельных случаях 12 см. Насыпные почвы концентрируются вблизи опор и занимают незначительную площадь, равную 0,4 га (3,9 %). В процентном отношении их количество составля-

**Таблица 2.** Состав и показатели антропогенных почв, характеристики выделенных участков в пересчете на 1 км трассы ВЛ СВН площади (га), процент от общей площади (%), количество участков (шт.), средний размер площади (м<sup>2</sup>), частота встречаемости (шт./га)

**Table 2.** Structure and quantitative characteristic of anthropogenic soils per 1 km of the trace depending on the area (ha), the percentage of the total area (%), the number (N), the average area of one site (m<sup>2</sup>), occurrence (N/ha)

Типы почв Soil type	Мощность, см Strength, cm	Объемная масса, г/Кб.см Density, g per cubic centimeter	Площадь, га Area, (ha)	Процент от общей площади 9,6 га (%) Percentage of the total area 9,6 ha	Процент от N Percentage of N	Средний размер участка, м <sup>2</sup> Average size of one site, m <sup>2</sup>	Встречаемость шт./га Occurrence (N/ha)	Степень деградации Degradation degree
Резектозем 1 Resectozem 1	5–7	1	0,2	2,2	13,5	30	7,2	Слабо деградированные Slightly degraded
Насыпные почвы Mound soils	5–7	0,82–0,99	0,4	3,9	10,8	70	5,7	Средне деградированные Mean degraded
Резектозем 2 Resectozem 2	1–3	0,76–1,01	1,1	11,0	32,7	64	17,3	Средне деградированные Mean degraded
Абразем Abrazems	2–5	0,95–1,47	1,0	10,4	43,1	45	22,8	Сильно деградированные Strongly degraded

ют 10,8 %. Они имеют максимальный среднюю площадь участка (70 м<sup>2</sup>). Число же участков на единицу площади СЗЗ минимально (5,7 экз./га). То есть насыпные почвы выделяются в виде сравнительно крупных участков, но редких по сравнению с другими типами антропогенных почв. Насыпные почвы активно осваиваются корнями растительности, но так как естественная почва заменена искусственным грунтом, они отнесены к категории сильно деградированных почв.

У резектозема 2 объемная масса верхнего слоя почвы колеблется в пределах 0,76–1,01 г/см<sup>3</sup>. Восстановление дернового слоя замедлено в силу того, что экспонируется элювиальный горизонт, обедненный химическими элементами питания растений, обогащенный SiO<sub>2</sub>, имеющий листоватую слоистую структуру, что свойственно типу дерново-подзолистых почв. Мощность сформированного дернового слоя эмбриозема составляет 1–3 см. Резектозем 2 занимает наибольшую площадь, составляющую 1,1 га (11 %). Процент от общего количества равен 32,7, что существенно больше, чем у насыпных почв и резектоземов 1. Встречаемость составляет 17,3 шт./га. Размеры среднего участка также велики – 64 га. Встречаемость, отражающая присутствие участков, на 1 га равна 17,3 шт./га. Травостой заметно ниже, чем в предыдущих случаях, что оценивается как средняя деградация.

В абраземе плотность верхнего слоя составляет 0,95–1,47 г/см<sup>3</sup>. Высокая плотность горизонта ненарушенного сложения препятствует быстрому заселению растительности, что затрудняет естественное восстановление этих почв. Мощность сформированного дернового горизонта эмбриозема изменяется в интервале 3–5 см. Площадь абразема составляет 1 га (10,4 %), процент от общего количества – 43,1 %. Средний размер площади нарушенного участка – 54 м<sup>2</sup>, что ниже, чем у резектоземов 2 и насыпных почв. Встречаемость наиболее высокая (22,8 экз./га) относительно других типов

нарушенных почв. Участки земель СЗЗ с такими почвами считались сильно деградированными, так как в силу высокой плотности очень медленно заселяются растительностью, имеют низкорослый и разреженный травостой.

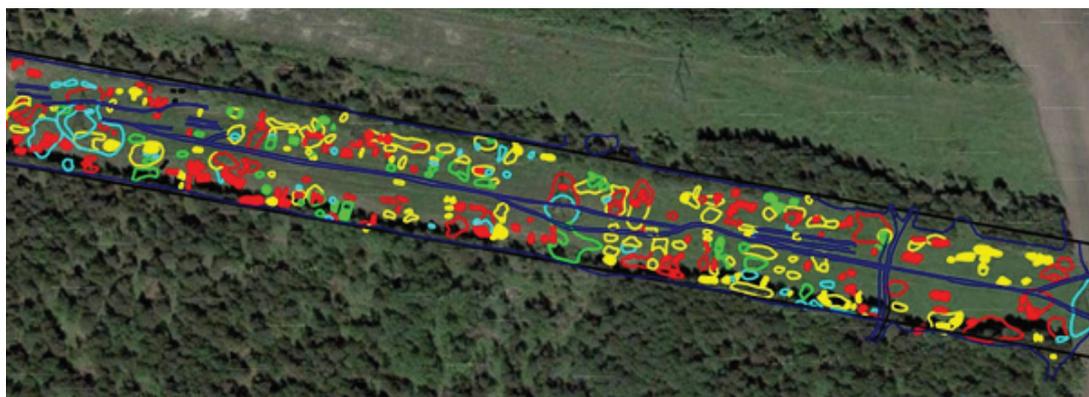
Под линией электропередачи присутствуют почвы, подвергшиеся многократному проезду ходовых частей техники по одному месту, что привело к образованию колеи, дороги. Треки могут быть образованы ходовыми системами трактора при операции подвески и натяжении проводов воздушной линии. Треки и грунтовые дороги имеют высокую плотность почв (1,20–1,50 г/см<sup>3</sup>). Они занимают незначительные площади, поэтому их свойства не изучались, но фиксировались при морфологических описаниях почв.

Для практического использования определены группы деградации земель по свойствам поверхностного горизонта (рис. 2): насыпные почвы (стратолиты и стратоземы) являются сильно нарушенными почвами, резектозем 1 определен слаборазрушенной почвой, резектозем 2 – среднеразрушенной, и абразем выделен, как сильнонарушенная почва.

Сравнивая нарушенные участки, датированные 1986 г., при эксплуатационной чистке древесной растительности, с общим фоном антропогенных почв, установили, что площади нарушения земель при строительстве составляют 1,43 га (19,7 %), а эксплуатационные – 0,38 га (5,26 %). Сравнение выборок по размерам площадей нарушенных участков с помощью U-test Манна-Уитни показывает их достоверное различие при  $p > 0,95$ .

С использованием непараметрического анализа Краскела-Уоллиса установлено, что ректозем 2 и абразем имеют достоверные различия при  $p > 0,95$  по размерам площадей участков из-за большой численности выборки относительно группы легко деградированных почв.

Изучена форма контуров антропогенных почв и проведено сравнение по фактору формы основных



**Рис. 2.** Пространственное расположение антропогенных почв СЗЗ: голубой линией отображены насыпные почвы; зеленой – слаборазрушенные (резектозем 1); желтой – среднеразрушенные (резектозем 2); красной – сильнонарушенные (абразем); синей – дороги и колеи; полностью закрашены эксплуатационные нарушения; черной линией обозначена граница СЗЗ

**Fig. 2.** Spatial position of the anthropogenic soils on the SPZ territory: the blue line indicates the mound soils; resectozem 1 is marked by the green line; resectozem 2 is shown in yellow line; the red line indicates abrazems; tracks and dirt roads are in dark blue line, operational soil disturbances are fully painted, the SPZ boundary is marked by the black line

таксонов нарушенных почв СЗЗ. Выявлено, что по форме контура стратоземы достоверно (при  $p > 0,95$ ) отличаются от абраземов. Первые более округлы, а форма вторых более изрезана или близка к треугольной. Формы контуров абраземов и резектоземов не различаются.

Визуальными наблюдениями установлено, что извилистые формы быстро сглаживаются, переходя в овалы, которые сохраняются длительное время. Фактор формы нарушений при строительстве имеет модальное значение 0,8–0,9 при эксплуатации 0,7–0,8. Это говорит о том, что в первом случае преобладают округлые формы, во втором – вытянутые и угловатые. Различия достоверны при  $p > 0,95$ . По возрасту строительные и эксплуатационные нарушения почв имеют разницу в 20 лет. Если считать, что при строительстве преобладающая форма нарушений схожа с эксплуатационными нарушениями, то наблюдаемые изменения обусловлены естественным восстановлением, что подтверждают визуальные наблюдения.

Степень деградации территории СЗЗ можно оценить на основе критериев нормативных документов, учитывающих глубину нарушения профиля почвы и площадь обнаженной породы [14]. Площадь обнаженной породы при степени деградации 0 составляет 0–2 % от общей площади, при 1 – 3–5 %, 2 – 5–10 %, 3 – 11–25 %, 4 – >25 %. Если подходить объективно, то абразем, хоть и имеет остатки иллювиального горизонта (Вt), но по сути представляет полностью нарушенный почвенный профиль, хоть на экспонируемой поверхности всегда присутствуют остатки вышележащих горизонтов. Если считать абразем, стратолиты и стратоземы уничтожением естественной почвы, суммарная площадь которых составляет 14,3 %, то деградация почвенного покрова СЗЗ ВЛ СВН оценивается третьей степенью при максимально возможной 4.

Биоразнообразие почв СЗЗ не исчерпывается антропогенными почвами, а дополняется естественной неоднородностью почвенного покрова зоны бореальных лесов. Установлено воздействие на почву произрастающими деревьями [15, 16, 17]. Показано, что почва сохраняет следы предыдущих этапов своего развития (почво-память). В русскоязычной литературе участок в пределах проекции кроны, подверженный влиянию роста корневой шейки и корней, называется парцеллой. Следы произрастания деревьев обнаружены в почвах СЗЗ через 20 лет после строительства ВЛ СВН. Этот факт статистически достоверно выявлен при сравнении площади сечения ячеи сети трещин элювиального горизонта [18]. Оказывается, что она больше в зоне воздействия произраставшего в ней ранее дерева. Обнаружено, что в рельефе поверхности почвы СЗЗ отражается форма крупных корней лесной парцеллы. Проведенные исследования земель СЗЗ позволяют определить общую усадку объема почвы на ней, произошедшую после лесной стадии развития [19]. Она обусловлена разложением

древесных корней и уплотнением освободившегося объема.

Таким образом, неоднородность почвенного покрова территории СЗЗ, формирующаяся в бореальной зоне лесов, очень высока и определяется естественными и антропогенными факторами. Отражение феноменов деградации и естественного восстановления земель СЗЗ ВЛ СВН на основе существующих диагностических методов и классификационных схем затруднено, но в принципе возможно с достаточно высокой степенью детализации пространственного расположения, размеров и формы контуров. Успех детального картографирования деградированных земель стал возможен после использования вейвлет-анализа неоднородности почвенного покрова на разных масштабах исследования [12, 20], что позволяет определить характеристические размеры неоднородности антропогенного почвенного покрова.

Следующим шагом необходимо установить нормативы по составу и количеству типов антропогенных почв, образующихся при строительстве и эксплуатации ВЛ СВН, а также степень деградации земель, после которой рекультивация становится обязательной, независимо от срока давности строительства объектов энергетики.

#### Выводы

На территории санитарно-защитной зоны антропогенное воздействие накапливается на естественную неоднородность лесных почв, существовавшую до строительства ВЛ СВН. Технологические процессы (установка опор, подвеска проводов, расчистка СЗЗ от растительности) приводят к созданию различных по масштабу, возрасту и происхождению неоднородностей почвенного покрова, что создает мелкоконтурность антропогенного почвенного покрова и является основой биоразнообразия почв.

Показано, что возможно выделение 4-х основных типов/подтипов антропогенных почв СЗЗ: стратоземы и стратолиты (синлитогенный ствол), резектозем (1) дерново-подзолистой почвы и резектозем (2) дерново-подзолистой почвы (постлитогенный ствол, текстурно-дифференцированный отдел, тип дерново-подзолистых почв), абразем (постлитогенный ствол).

Установлено, что биоразнообразие почв СЗЗ включает: насыпные почвы – 2,2 %, резектозем (1) – 3,9 %, резектозем (2) – 11 %, абразем – 10 %. Площади антропогенно-измененных почв нарушенного сложения составляют 27,5 % от изученной площади. Площадь сильно деградированных земель составляет 14,3 %, что оценивается, как 3-я степень деградации земель при градациях от 0 до 4.

Распределение размеров площадей участков антропогенно-измененных почв имеет степенную форму с длинными хвостами в сторону максимальных значений. Сравнение распределения площадей участков по типам антропогенных почв показывает, что существуют достоверные различия между абраземом и резектоземом 2 ( $p > 0,95$ ).

По фактору формы насыпные почвы достоверно более округлые ( $p > 0,95$ ), чем участки абразивов. Нарушения, образовавшиеся при строительстве, более обширны и разнообразны по форме, чем нарушения, образовавшиеся в период эксплуатации (при  $p > 0,95$ ). Показано, что за период в 20 лет форма контуров антропогенных почв от изрезанной и треугольной изменяется в направлении к округлой форме.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Climate change and land degradation: Bridging knowledge and stakeholders. The 3<sup>rd</sup> UNCCD scientific conference. – Mexico, Cancun, 09–12 March 2015. URL: [http://www.unccd.int/Lists/SiteDocumentLibrary/Publications/2015\\_Climate\\_LD\\_Outcomes\\_CST\\_Conf\\_ENG.pdf](http://www.unccd.int/Lists/SiteDocumentLibrary/Publications/2015_Climate_LD_Outcomes_CST_Conf_ENG.pdf) (дата обращения: 30.05.2016).
2. Mapping of soil properties and land degradation risk in Africa using MODIS reflectance / Vägen a Tor-G., L.A. Winowiecki, J.E. Tondoh, L.T. Desta, T. Gumbricht // *Geoderma*. – 1 February 2016. – V. 263. – P. 216–225. DOI:10.1016/j.geoderma.2015.06.023.
3. Классификация и диагностика почв России / Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. – Смоленск: Изд-во Ойкумена, 2004. – 341 с.
4. Podgorodenka natural-technogenic soil catena: Morphological, physicochemical, and chemical properties / A.M. Derbentseva, A.V. Chernovalova, M.M. Surzhik, O.V. Nesterova, V.A. Semal, N.A. Ribachuk, L.P. Mayorova // *Contemporary Problems of Ecology*. – 2015. – V. 8. – P. 99–111.
5. Volungevičius J., Skorupskas R. Classification of anthropogenic soil transformation // *Geologija*. – 2011. – V. 53. – № 4 (76). – P. 165–177.
6. CLEANSOIL as a perspective method of remediation of oil-contaminated soils under existing infrastructure / Yu.V. Korzhov, E.D. Lapshina, D.I. Khoroshev, A.V. Zakharchenko, M.G. Kulrkov, D.M. Yarkov // *Siberian Ecological Journal*. – 2010. – V. 3. – Iss. 3. – P. 292–298. DOI: 10.1134/S1995425510030069.
7. Львов Ю.А. Экологические изменения при строительстве и эксплуатации воздушных линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения // *Электропередачи сверхвысокого напряжения и экология: сборник научных трудов*. – М.: ЭНИН, 1986. – С. 48–62.
8. Каскевич Э.П., Плеханов Г.Ф. Экологическая характеристика электропередач сверх- и ультравысокого напряжения // *AC Power Delivery at Long and Very Long Distances: International Scientific and Technical Conference*. – Новосибирск, 15–19 Сентября, 2003. – Новосибирск: Изд-во СИБНИИЭ, 2003. – Т. 1. – С. 311–322.
9. Карташев А.Г. Электромагнитная экология. – Томск: ТГУ, 2000. – 276 с.
10. Zakharchenko A.V., Zakharchenko N.V. Three-Dimensional Surface Morphometry of Soil Horizons in Field Studies // *Eurasian*

Почвенный покров бореальных лесов в санитарно-защитных зонах воздушных линий электропередачи, эксплуатирующийся с прошлого века, имеет высокую степень деградации земель, поэтому для ускорения регенерации нуждается в проведении стандартных мероприятий биологической рекультивации, таких как рыхление, подсев многолетних трав.

- Soil Science. – 2006. – V. 39. – № 2. – P. 134–140. DOI: 10.1134/S1064229306020037.
11. Кирпотин С.Н. К изучению восстановительных процессов на просеках ВЛ СВН. Охрана и рациональное использование природных ресурсов Западной Сибири. – Томск: ТГУ, 1985. – С. 92.
12. Захарченко А.В., Алексеев В.И., Ипатова Д.В. Иерархическая концепция неоднородности почв и планирование масштаба исследования // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 4. – С. 149–163.
13. Волкова В.С. Стратиграфия и тренд палеотемператур в палеогене и неогене Западной Сибири (по данным палинологии) // *Геология и геофизика*. – 2011. – Т. 52. – № 7. – С. 906–915.
14. Методика определения размеров ущерба от деградации почв и земель: письмо от 29 июля 1994 г. № 3–14–2/1139 / Комитет Российской Федерации по земельным ресурсам и землеустройству.
15. Phillips J.D., Marion D.A. Biomechanical effects, lithological variations, and local pedodiversity in some forest soils of Arkansas // *Geoderma*. – 2005. – V. 124. – P. 73–89. DOI: 10.1016/j.geoderma.2004.04.004.
16. Phillips J.D., Marion D.A. Pedological memory in forest soil development // *For. Ecol. Manage.* – 2004. – V. 188. – P. 363–380.
17. Soil mixing and genesis as affected by tree uprooting in three temperate forests / P. Šamonil, P. Daněk, R.J. Schaetzl, I. Vašíčková, M. Valtera // *European Journal of Soil Science*. – May 2015. – V. 66. – P. 589–603. DOI: 10.1111/ejss.12245
18. Захарченко А.В. Характеристики трещинной сети в зависимости от экологических условий земель лесных и линий электропередачи // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2014. – № 8. – С. 392–397.
19. Захарченко А.В. Пространственная сопряженность морфологических поверхностей почв // *Вестник ТГУ*. – 2007. – № 300–3. – С. 146–152.
20. Geopedology. An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies / J.A. Zinck, G. Metternicht, G. Bocco, H.F. del Valle. – Switzerland: Springer International publishing, 2016. 549 p. DOI: 10.1007/978-3-319-19159-1\_1.

Поступила 27.06.2016 г.

#### Информация об авторах

**Захарченко А.В.**, доктор биологических наук, профессор кафедры общей геологии и землеустройства Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Пасько О.А.**, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры общей геологии и землеустройства Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Ипатова Д.В.**, студентка кафедры общей геологии и землеустройства Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Рудина Т.В.**, аспирант кафедры почвоведения и экологии почв, младший научный сотрудник лаборатории БИО-ГЕО-КЛИМ Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDC 631.474

## ANTHROPOGENIC SOILS ON FOREST LAND OF SANITARY PROTECTION ZONE OF EXTRA HIGH VOLTAGE OVERHEAD LINES

**Alexandr V. Zakharchenko<sup>1</sup>,**

zakh@ptu.ru

**Olga A. Pasko<sup>1</sup>,**

oap@sibmail.com

**Darya V. Ipatova<sup>1</sup>,**

ipatovadasha@gmail.com

**Tatiana V. Raudina<sup>2</sup>,**

tanya\_raud@mail.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>2</sup> National Research Tomsk State University,  
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**Relevance.** Anthropogenic soils, which have lost their natural state, are the poorly known objects. The facts of soil degradation are determined on the forest lands under the overhead transmission line in the sanitary protection zone. These facts are not taken into account by designers of the objects. It is caused by uprooting of woody vegetation. Taking into account the length of power lines on the forest land, the effects can be global.

**The main aim** of the study is diagnostics and mapping of soils in a zone of the boreal forest on lands of sanitary protection zone formed at construction and operation of objects.

**The object** of the study is the anthropogenic disturbed soil cover of the sanitary protection zone of a transmission line.

**The methods used in the study.** On the basis of calculations of the soil heterogeneity hierarchical structure in sanitary protection zone, the observation grid of anthropogenic soils with 40 m distance between the nodes was recommended. The soil body boundaries were identified at the scale 1:1000. Sample size was 320 sites. The authors have used nonparametric types of analysis on the basis of a STATISTICA package.

**The results.** The authors analyzed soils biodiversity and defined the extent of lands degradation in a sanitary protection zone; considered the space characteristics of sites of anthropogenic soils.

**Conclusion.** The anthropogenic impact on the lands of sanitary protection zone results in a development of soil cover degradation of different scale, age and origin. It is possible to identify 4 main types of anthropogenic soils of the sanitary protection zone, namely: 1) filled soils (stratozems and stratolit); 2) resectozem 1 of umbric albeluvisols; 3) resectozem 2 of umbric albeluvisols; 4) abrazem. The disturbed areas are superimposed on the natural heterogeneity of the remaining forest soils. It was found that pedodiversity of sanitary protection zone includes 2,2 % of filled soils, 3,9 % of resectozems 1 of umbric albeluvisols, 11 % of resectozems 2 of umbric albeluvisols and 10,4 % of abrazems. The average area of one site is maximum for filled soils (69,5 m<sup>2</sup>). The anthropogenic soils area is 27,5 % of the area sanitary protection zone. The extent of soil cover degradation is 3 out of 5. During the construction the soil damages are more extensive and more shape-varied, than during the operation period. Comparison of disturbance areas on anthropogenic soil types allows revealing significant differences between resectozems of umbric albeluvisols 2 and abrazems. According to the form factor the contours of filled soils area are significantly more rounded than the abrazems area. The soil cover is highly degraded and needs rehabilitation.

### Key words:

Anthropogenic soils, sod-podzolic with the second humic horizon, degraded lands, pedodiversity, sanitary protection zone, overhead power lines.

### REFERENCES

1. Climate change and land degradation: Bridging knowledge and stakeholders. *The 3rd UNCCD scientific conference*. Mexico, Cancun, 09–12 March 2015. Available at: [http://www.unccd.int/Lists/SiteDocumentLibrary/Publications/2015\\_Climate\\_LD\\_Outcomes\\_CST\\_Conf\\_ENG.pdf](http://www.unccd.int/Lists/SiteDocumentLibrary/Publications/2015_Climate_LD_Outcomes_CST_Conf_ENG.pdf) (accessed 10 May 2016).
2. Vågen a Tor-G., Winowiecki L.A., Tondoh J.E., Desta L.T., Gumbrecht T. Mapping of soil properties and land degradation risk in Africa using MODIS reflectance. *Geoderma*, 1 February 2016, vol. 263, pp. 216–225. DOI:10.1016/j.geoderma.2015.06.023.
3. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* [Classification and diagnostics of soils in Russia]. Smolensk, Oykumena Publ., 2004. 341 p.
4. Derbentseva A.M., Chernovalova A.V., Surzhik M.M., Nesterova O.V., Semal V.A., Ribachuk N.A., Mayorova L.P. Podgorodka natural-technogenic soil catena: Morphological, physico-mechanical, and chemical properties. *Contemporary Problems of Ecology*, 2015, vol. 8, pp. 99–111.
5. Volungevičius J., Skorupskas R. Classification of anthropogenic soil transformation. *Geologija*, 2011, vol. 53, no. 4 (76), pp. 165–177.
6. Korzhov Yu.V., Lapshina E.D., Khoroshev D.I., Zakharchenko A.V., Kul'kov M.G., Yarkov D.M. CLEAN SOIL as a perspective method of remediation of oil-contaminated soils under existing

- infrastructure. *Siberian Ecological Journal*, 2010, vol. 3, Iss. 3, pp. 292–298. DOI: 10.1134/S1995425510030069.
7. Lvov Yu.A. Ekologicheskie izmeneniya pri stroitelstve i ekspluatatsii vozduzhnykh liniy elektropredachi vysokogo i sverkhvysokogo napryazheniya [Ecological changes when constructing and operation of overhead high- and extra-voltage lines]. *Elektropredachi sverkhvysokogo napryazheniya i ekologiya: sbornik nauchnykh trudov* [Power transmission of extra-high voltage and ecology: collected papers]. Moscow, ENIN Press, 1986. pp. 48–62.
  8. Kaskevich E.P., Plekhanov G.F. Ekologicheskaya kharakteristika elektropredach sverkh- i ultravysokogo napryazheniya [Ecological characteristic of power transmission with extra-high and ultra-high voltage]. *AC Power Delivery at Long and Very Long Distances. International Scientific and Technical Conference*. Novosibirsk, Russia, September 15–19, 2003. Novosibirsk, SIBNIE Publ., 2003. Vol. 1, pp. 311–322.
  9. Kartashev A.G. *Elektromagnitnaya ekologiya* [Electromagnetic ecology]. Tomsk, TGU Press, 2000. 276 p.
  10. Zakharchenko A.V., Zakharchenko N.V. Three-Dimensional Surface Morphometry of Soil Horizons in Field Studies. *Eurasian Soil Science*, 2006, vol. 39, no. 2, pp. 134–140. DOI: 10.1134/S1064229306020037.
  11. Kirpotin S.N. K izucheniyu vosstanovitelnykh protsessov na prosekakh VL SVN [Studying the reduction processes on EHV HV]. *Okhrana i ratsionalnoe ispolzovanie prirodnnykh resursov Zapadnoy Sibiri* [Conservation and rational use of natural resources of Western Siberia]. Tomsk, TGU Press, 1985. p. 92.
  12. Zakharchenko A.V., Alekseev V.I., Ipatova D.V. Hierarchical concept of soil heterogeneity and planning the scale of investigations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 4, pp. 149–163. In Rus.
  13. Volkova V.S. Stratigrafiya i trend paleotemperatur v paleogene i neogene Zapadnoy Sibiri (po dannym palinologii) [Stratigraphy and trend of paleotemperatures in Paleogene and Neogene of Western Siberia]. *Geologiya i geofizika*, 2011, vol. 52, no. 7, pp. 906–915.
  14. *Metodika opredeleniya razmerov ushcherba ot degradatsii pochvy i zemel: pismo ot 29 iyulya 1994 g. № 3–14–2/1139* [Technique of determining the extent of damage from soil and land degradation: the letter from 29 July 1994, no. 3–14–2/1139]. The Committee of the Russian Federation on Natural Resources and Land Management.
  15. Phillips J.D., Marion D.A. Biomechanical effects, lithological variations, and local pedodiversity in some forest soils of Arkansas. *Geoderma*, 2005, vol. 124, pp. 73–89. DOI: 10.1016/j.geoderma.2004.04.004.
  16. Phillips J.D., Marion D.A. Pedological memory in forest soil development. *Forest Ecology and Management*, 2004. vol. 188, pp. 363–380.
  17. Šamonil P., Daněk P., Schaetzl R.J., Vašíčková I., Valtera M. Soil mixing and genesis as affected by tree uprooting in three temperate forests. *European Journal of Soil Science*, May 2015, vol. 66, pp. 589–603. DOI: 10.1111/ejss.12245
  18. Zakharchenko A.V. Kharakteristiki treshchinnoy seti v zavisimosti ot ekologicheskikh uslovy zemel lesnykh i liny elektropredachi [Characteristics of fracture network depending onecological state of forest lands and power transmission lines]. *Mezhdunarodny zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovany*, 2014, no. 8, pp. 392–397.
  19. Zakharchenko A.V. Spatial conjugation of soils morphological surfaces. *Tomsk State University Journal*, 2007, no. 300 (II), pp. 139–145. In Rus.
  20. Zinck J.A., Metternicht G., Bocco G., Del Valle H.F. *Geopedology. An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies*. Switzerland, Springer International publishing, 2016. 549 p. DOI: 10.1007/978-3-319-19159-1\_1.

Received: 27 June 2016.

#### Information about the authors

**Alexandr V. Zakharchenko**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Olga A. Pasko**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Darya V. Ipatova**, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Tatiana V. Raudina**, junior researcher of BIO-GEO-CLIM Laboratory, National Research Tomsk State University.

УДК 552.086; 552.581

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭОЦЕНОВЫХ И ПАЛЕОЦЕНОВЫХ ДИАТОМИТОВ ЗАУРАЛЬЯ (НА ПРИМЕРЕ КАМЫШЛОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И РАЗРЕЗА БРУСЯНА)

Смирнов Павел Витальевич<sup>1</sup>,  
geolog.08@mail.ru

Константинов Александр Олегович<sup>1</sup>,  
konstantinov.alexandr72@gmail.com

<sup>1</sup> Тюменский государственный нефтегазовый университет,  
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

**Актуальность.** Кремнистый разрез Зауралья, как правило, имеет трехчленное строение: внизу залегают опоки серовской свиты, выше – диатомиты и диатомовые глины ирбитской свиты. Основные месторождения диатомитов в регионе (Ирбитское, Камышловское, Потанинское и др.) приурочены к ирбитской свите нижнего эоцена, которая традиционно рассматривается в качестве основного продуктивного горизонта на данный вид минерального сырья. В то же время образование толщи диатомитов Зауралья началось в терминальную стадию палеоцена, что фиксируется по присутствию диатомового комплекса *Trinacria ventriculosa-Sheshukovia mirabilis*. К настоящему времени особенности литологии палеоценовых диатомитов серовской свиты практически не изучены, отсутствуют сведения о достоверно установленных обнажениях диатомитов серовской свиты в пределах Зауралья, не определен их промышленный потенциал.

**Цель работы:** сравнительное исследование особенностей литологии, химического и минералогического составов эоценовых диатомитов ирбитской свиты (Камышловский карьер) и верхнепалеоценовых диатомитов серовской свиты (разрез Брусаяна).

**Методы исследований:** полевые исследования, рентгеноструктурный анализ, рентгенофлуоресцентный анализ, инфракрасная спектроскопия, масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой, сканирующая электронная микроскопия, литолого-петрографический анализ.

**Результаты.** Впервые представлены результаты исследований химического и минералогического составов, особенностей литологии и микростроения палеоценовых диатомитов Зауралья на примере пород, вскрытых в разрезе Брусаяна (Свердловская область). Установлено, что палеоценовые диатомиты разреза Брусаяна по содержанию  $SiO_2$ , сохранности диатомовых фоссилий и микропористости превосходят эоценовые диатомиты и диатомовые глины большинства месторождений Зауралья и, соответственно, могут рассматриваться как перспективный объект поисковых работ на кремнистое минеральное сырье. Для палеоценовых диатомитов серовской свиты характерны более высокие содержания глауконита и терригенного материала (до 10 %), что, по всей видимости, идентифицирует активизацию эрозийных процессов в пределах седиментационного бассейна на ранних этапах формирования толщи диатомитов Зауралья.

### Ключевые слова:

Опал-кристобалитовые породы, диатомит, ирбитская свита, серовская свита, Зауралье, Камышлов, Брусаяна, литология.

### Введение

Территория Среднего Зауралья характеризуется значительным распространением опал-кристобалитовых пород – палеоцен-эоценовых диатомитов, диатомовых глин, трепелов и опок [1]. В геологической практике принято считать, что принадлежность пород кремнистого разреза Зауралья к различным стратиграфическим подразделениям устанавливается без дополнительных исследований литологического состава: опоки относят к серовской свите верхнего палеоцена, диатомиты и диатомовые глины – к ирбитской свите нижнего эоцена [2, 3]. Отсутствие достоверно установленных обнажений диатомитов серовской свиты привело к тому, что диатомиты и диатомовые глины Зауралья полностью отнесены к ирбитской свите, поскольку данные о литологических различиях между палеоценовыми и эоценовыми диатомитами в современной литературе не представлены. Вместе с тем формирование диатомитов в Зауралье происходило и в серовское время, что устанавливается по развитию диатомового комплекса *Trinacria ventriculosa-Sheshukovia mirabilis* верхнепалеоценового возраста [4, 5].

Особенности литологии отложений, формирование которых приходится на рубеж палеоцена и эоцена (палеоцен-эоценовый максимум – РЕТМ), представляют значительный интерес для реконструкции палеогеографических условий ранних этапов биогенного кремненакопления в Западно-Сибирском палеогеновом бассейне. РЕТМ – одно из наиболее крупных и относительно кратковременных глобальных изменений климатических условий в масштабах всей планеты [6–8], сопровождавшееся общим повышением температуры и трансформацией систем океанической и атмосферной циркуляций. Данное событие повлекло за собой существенные изменения условий и характера седиментации, геохимического и минерального составов морских и океанических осадков [9], сукцессии флоры и фауны [10–12].

Особенно контрастно общепланетарные изменения природных условий на рубеже палеоцена и эоцена проявились для территорий, относящихся к высоким широтам, в том числе для Западной Сибири и Зауралья [13]. На протяжении палеоцена-эоцена Зауралье было транзитной зоной в морском сообщении между Арктикой и Тетисом [14],

где в тепловодную фазу, соответствующую глобальному потеплению, и сформировались отложения серовской свиты.

В настоящей работе представлены результаты сравнительного анализа литологии диатомитов серовской свиты из разреза Брусяна (Сухоложский район, Свердловская область) и диатомитов ирбитской свиты из северного карьера Камышловского месторождения (Камышловский район, Свердловская область).

#### Объекты и методы исследований

Камышловское месторождение ( $56^{\circ}51'37.42''\text{N}$ ,  $62^{\circ}43'35.18''\text{E}$ ) расположено на северо-восточной окраине г. Камышлова Свердловской области, в 2 км от одноименной железнодорожной станции (рис. 1, а). Месторождение представляет собой крупную пластообразную залежь диатомитов, мощность которой в пределах участка исследований не подвергается существенному изменению. В границах разведанной площади месторождение сложено диатомитами ирбитской свиты и опоками серовской свиты [15]; диатомиты на всей площади перекрыты плиоцен-четвертичными отложениями максимальной мощностью до 6 м (рис. 1, б).

Разрез Брусяна ( $56^{\circ}56'51.43''\text{N}$ ,  $61^{\circ}55'43.27''\text{E}$ ) расположен в 3 км к северо-востоку от д. Брусяны Свердловской области и в 3 км к юго-западу от д. Глядены на правом берегу р. Калиновки (рис. 1, а). На протяжении 200–300 м вскрываются диатомиты, перекрытые маломощным слоем современных отложений (рис. 1, в).

Образцы для дальнейших лабораторных и микроскопических исследований отбирались из защищенной стенки карьера или обнажения. Лабораторные исследования включали рентгенофлуоресцентный силикатный анализ, рентгенофазовый анализ, определение элементного состава геологических образцов методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) [16, 17], инфракрасную спектроскопию. Исследования общего химического, элементного и минерального составов были выполнены в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН на базе Института геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск). Микроскопические исследования: изучение геологических образцов с использованием сканирующей электронной микроскопии (на аппаратно-программном комплексе на базе растрового электрон-

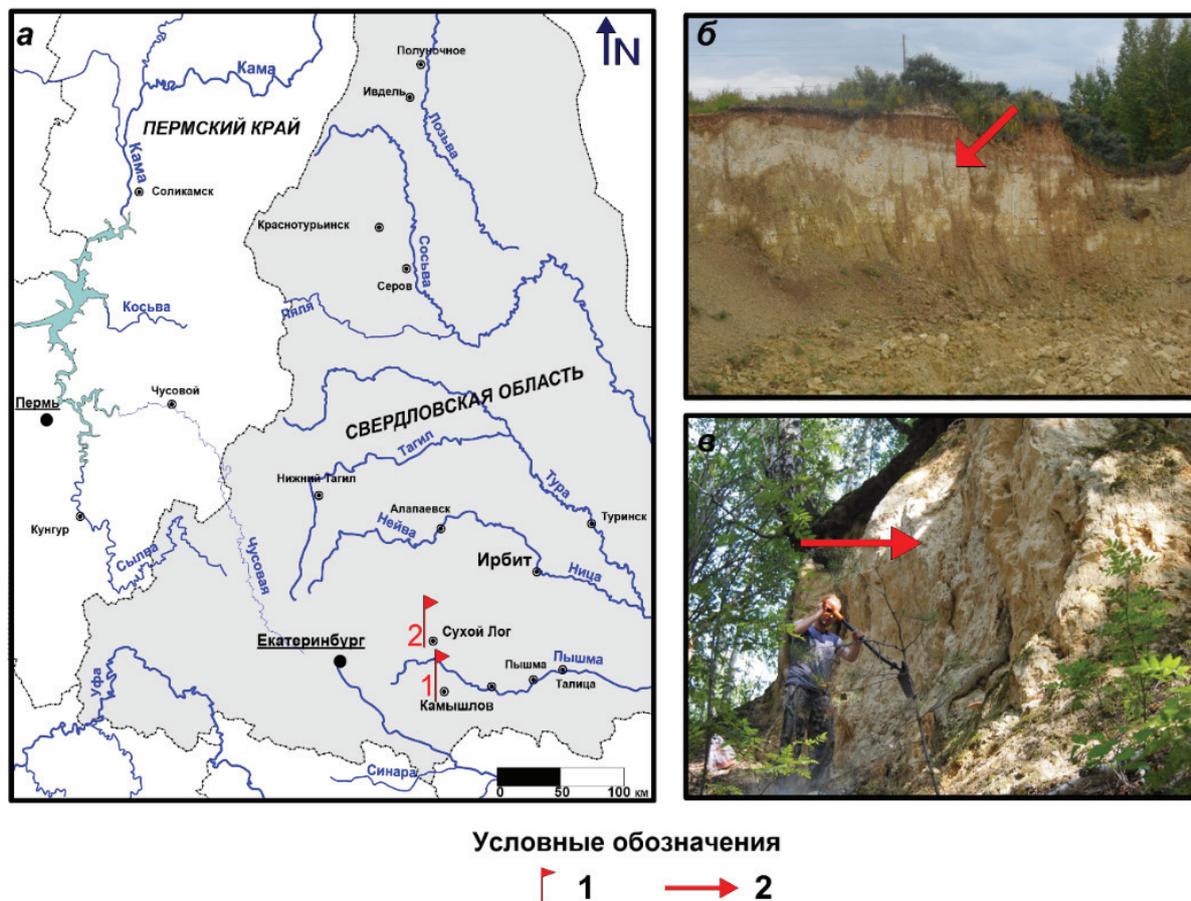


Рис. 1. Расположение объектов исследования: а) обзорная карта-схема; б) Камышловское месторождение диатомитов; в) естественное обнажение Брусяна. 1 – участки исследования; 2 – места отбора проб

Fig. 1. Location of the study objects: а) overview map; б) Kamyshev deposit; в) natural outcrop of Brusyana. 1 – studied areas, 2 – sampling sites

ного микроскопа JEOL JSM 6510A) и литолого-петрографического анализа (изучение в шлифах, изготовленных по стандартной методике [18]) – на базе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и ООО «ЗапСибГЦ» (г. Тюмень). Изучение составов диатомовых комплексов выполнено кандидатом геолого-минералогических наук, ведущим научным сотрудником лаборатории микропалеонтологии Геологического института РАН Т.В. Орешкиной.

### Результаты и обсуждения

Разновозрастные диатомиты характеризуются схожими макроскопическими описаниями: порода светло-серого со слабым желтоватым оттенком (Камышловское месторождение) или светло-серого (до белого) цвета (разрез Брусяна), слабосцементированная, лёгкая, при растирании пыльная, пачкает руки, липнет к языку, реакции с HCl не наблюдается.

Палеоценовые диатомиты, представленные в разрезе Брусяна, содержат комплекс, типичный для верхней части зоны *Trinacria ventriculosa* (b) верхов палеоцена, в котором не наблюдается признаков переотложения. Среди стратиграфических реперов встречены *Pyxidicula moelleri* (A.S.) *Strelnikova et Nikolaev*, *Trinacria cancellata* (Greville) *Sims & Ross*, *T. cornuta* (Greville) *Ross et Sims*, *Pseudotriceratium chenevieri* (Meister) *Gleser*, *Solium exsculptum* *Heiberg*, *Coscinodiscus denarius* *A. Schmidt*, *Grunowiella gemmata* (Grunow) *Van Heurck*, *G. palaeocaenica* *Jousé*, *Incisoria punctata* *Hajos*. В составе фоновых видов присутствуют *Stellarima microtrias* (Ehrenberg) *Hasle et Sims* *Anuloplicata concentrica* (A. Schmidt) *Gleser*, *A. ornata* (Grunow) *Gleser*, *Hemiaulus elegans* (Heiberg) *Grunow em. Homann*, *Paralia grunowii* *Gleser*, *Proboscia cretacea* (Hajos et *Stradner*) *Jordan and Priddle*, *P. spp.*, *Odontotropis carinata* *Grunow*, *Trinacria excavata* *Heiberg*, *T. regina* *Heiberg*, *T. heibergi* *Kitton*, *T. pileolus* (Ehr.) *Grunow*, *Costopyxis broschii* (Grunow) *Strelnikova et Nikolaev*, *Mycetacantus bis-*

*eriatum* (Strelnikova) *Strelnikova & Fourtanier*, *Valodiscus lanceolata* *Suto*, *Pseudopyxilla rossica* (Pantocshek) *Forti*, *Stellarima microtrias* (Ehrenberg) *Hasle et Sims*, *Pseudopodosira westii* (W. Smith) *Sheshukova et Gleser*.

Месторождения диатомита в пределах г. Камышлова неоднократно становились объектом микропалеонтологических исследований [13, 19]. Диатомовый комплекс в породах продуктивной толщи Камышловского месторождения представлен *Coscinodiscus payeri* (нижняя часть нижнего эоцена) и характеризуется присутствием мелких экземпляров индекс-вида, *Paralia crenulata* (Grunow) *Gleser* (доминант), *Proboscia cretacea* (Hajos et *Stradner*), *Anuloplicata concentrica* (A. Schmidt) *Gleser*, *Grunowiella gemmata* (Grunow) *Van Heurck*, *Solium exsculptum* *Heiberg*, *Costopyxis broschii* (Grunow) *Strelnikova et Nikolaev*, *Coscinodiscus argus* *Ehrenberg*, *Grunowiella gemmata* *Grunow*, *Pyxidicula moelleri* (A.S.) *Strelnikova et Nikolaev*, *Briggera sibirica* (Grunow) *Ross et Sims*, *Pseudostictodiscus angulatus* *Grunow*, *Odontotropis carinata* *Grunow*, *Odontotropis cristata* *Grunow*, *T. cornuta* (Greville) *Ross*, *Goniothecium odontella* *Ehrenberg*, *Stellarima microtrias* (Ehrenberg) *Hasle et Sims*.

Диатомиты содержат неравномерно распределенный терригенный материал: Брусяна – до 10 %; Камышлов – не более – 4–5 %. Главным образом он представлен угловатыми, полуокатанными, изометричными и удлинёнными зёрнами кварца, полевыми шпатами размером от <0,005 до 0,19 мм, для камышловского диатомита – не более 0,07 мм, а также чешуйками мусковита и чешуйками гидрослюды.

Содержание глинистых минералов в диатомитах обоих месторождений не велико; основную массу составляют бейделлит, хлорит и монтмориллонит. Диатомиты также содержат глауконит: зёрна глауконита ярко-желтого, желтого и желтовато-зелёного цвета, размером от <0,005 до 0,13 мм. Отдельные зёрна глауконита подвержены лимонитизации. В диатомите Брусяна (рис. 2, а) встре-

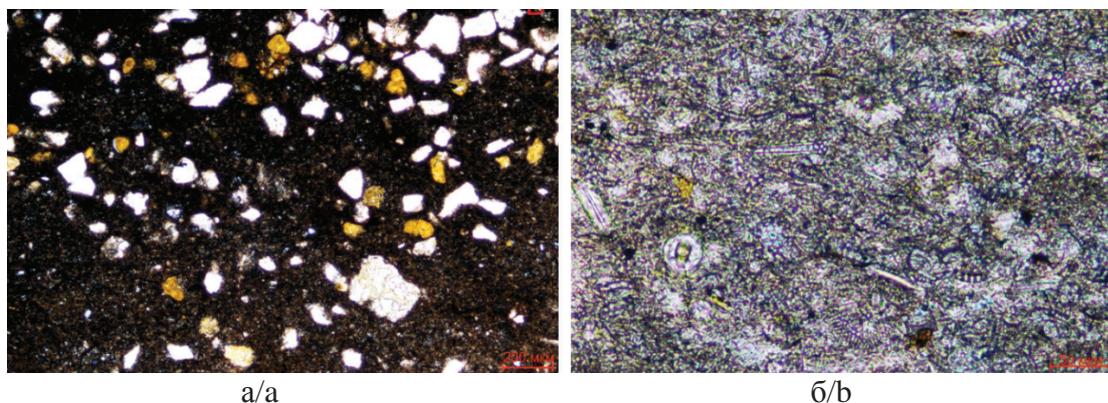
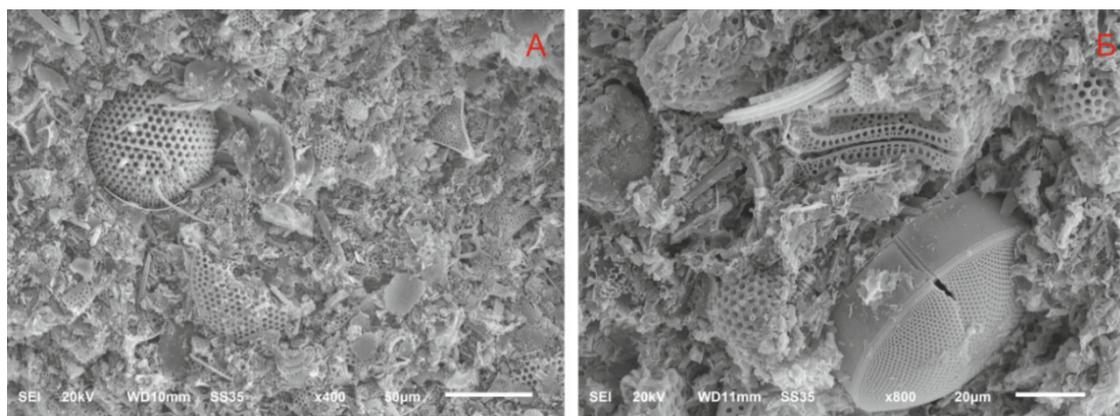


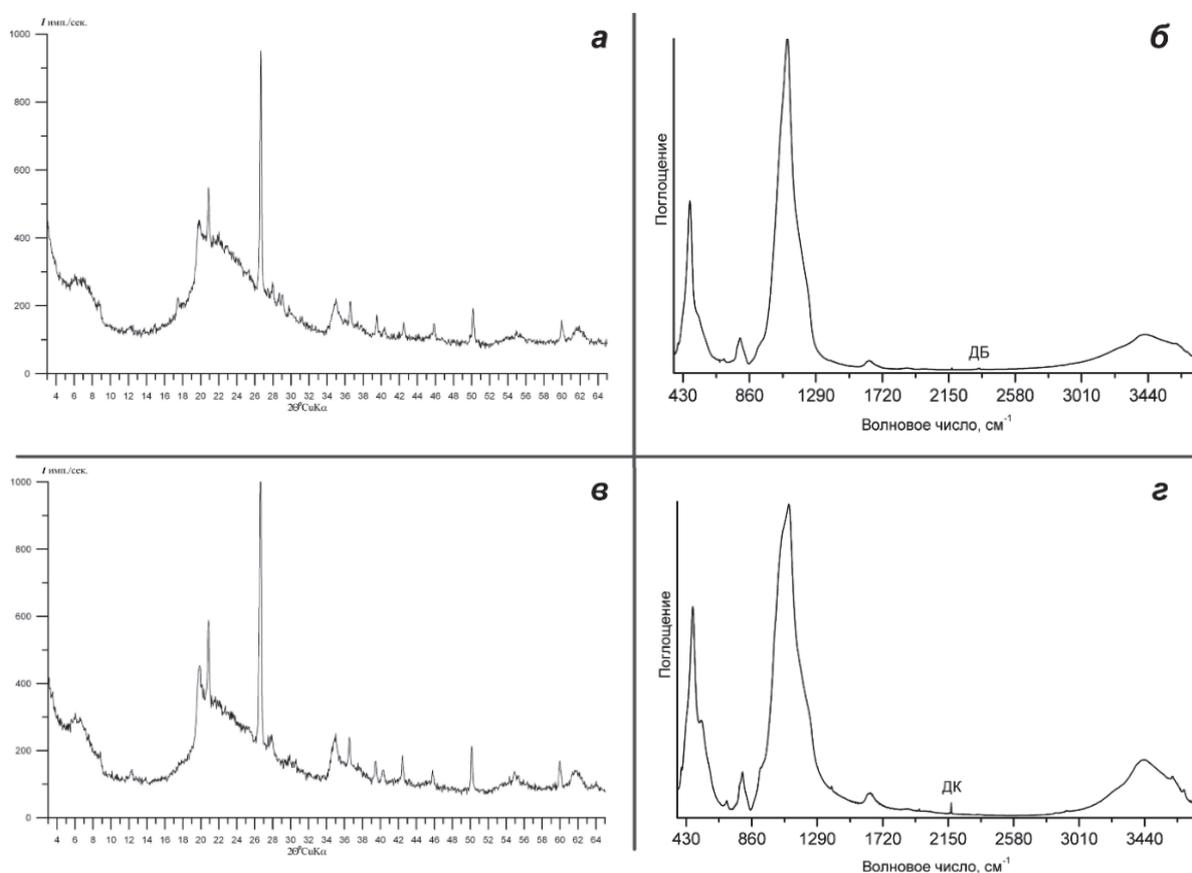
Рис. 2. Микроструктура диатомитов по результатам исследования породы в шлифах: а) диатомиты разреза Брусяна; б) диатомиты Камышловского месторождения

Fig. 2. Microstructure of the studied diatomites as a result of thin sections analysis: a) Paleocene diatomite from section Brusyana, b) Eocene diatomite form Kamyshev deposit



**Рис. 3.** Микроструктура диатомитов по результатам электронной микроскопии: а) диатомиты разреза Брусяна; б) диатомиты Камышловского месторождения

**Fig. 3.** Microstructure of the studied diatomites as a result of scanning electron microscopy: а) Paleocene diatomite from section Brusyana, б) Eocene diatomite form Kamyshlov deposit



**Рис. 4.** Рентгенограммы и ИК-спектры исследованных пород: а, в) палеоценовые диатомиты разреза Брусяна; б, г) эоценовые диатомиты Камышловского месторождения

**Fig. 4.** X-ray diagrams and IR-spectra of the studied rocks: а, в) Paleocene diatomite from section Brusyana; б, г) Eocene diatomite form Kamyshlov deposit

чены спикеры кремневых губок, осевые каналы которых заполнены глауконитом. Вместе с тем содержание глауконита отличается существенно: зерна глауконита в диатомите разреза Брусяна занимают существенную часть площади шлифа и по размерам крупнее, чем зерна в камышловской по-

роде (рис. 2, б). В числе основных примесей – кальций-натриевые цеолиты, пирит, гипс, магнетит, кальцит, пиролюзит, эпидот, очень мелкие обломки углефицированного растительного детрита.

Размер пор внутри створок составляет от <0,005 до 0,083 мм. По данным электронной ми-

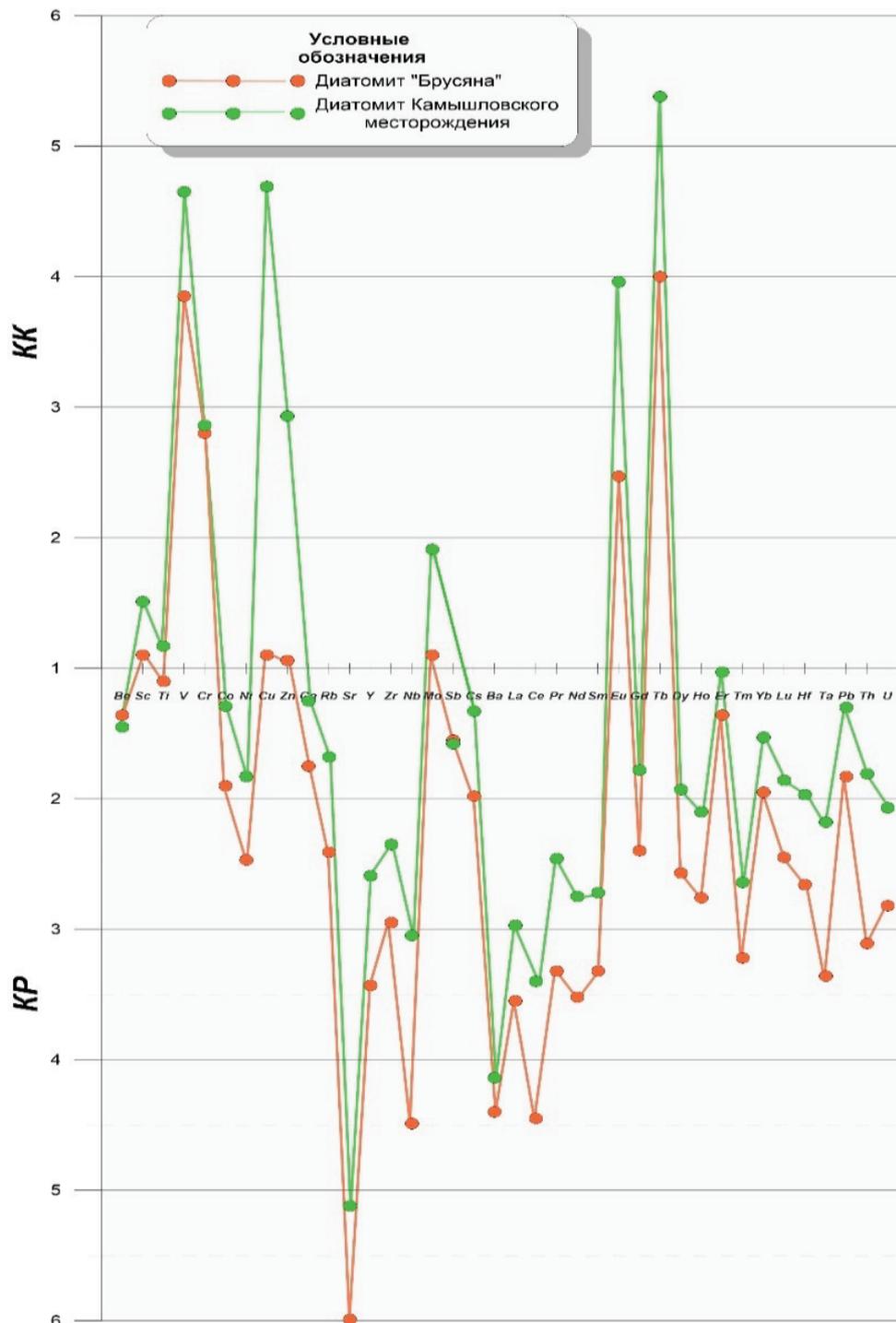
**Таблица.** Химический состав диатомитов

**Table.** Chemical composition of diatomites

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	BaO	SO <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	п.п.п., %/LOI, %
Б	79,07	6,10	3,61	0,01	0,96	0,35	0,24	0,98	0,11	0,02	0,03	0,03	0,02	<0,01	7,29	79,07
К	74,46	8,82	4,15	0,02	1,31	0,61	0,28	1,20	0,05	0,02	<0,03	0,04	0,02	<0,01	8,26	74,46

Примечание. Содержания элементов приведены в %. п. п. п. – потери при прокаливании. Б – разрез Брусяна. К – Камышловское месторождение.

Note. Elements content is in %. LOI is loss on ignition. B is the section Brusyana; K is the Kamyshlov deposit.



**Рис. 5.** Геохимические спектры диатомитов серовской и ирбитской свит

**Fig. 5.** Geochemical spectra of Serov and Irbit diatomites

кроскопии, диатомит Брусаяна (рис. 3, а) сложен преимущественно целыми створками и обломками диатомей с примесью спикул губок. Размеры последних достигают 500–600 мкм. Разнообразие диатомовых и степень сохранности форм выше, чем для диатомитов Камышловского месторождения (рис. 3, б).

Основные фазы, диагностированные по данным рентгеноструктурного анализа, – это опал, много меньше кварц, разупорядоченный смектит, малая примесь слюды, плагиоклаза, каолинита, следы калиевых полевых шпатов, ярозита (рис. 4). Индикатрисы рассеяния рентгеновских лучей для дифрактограмм Брусаяна и Камышлова имеют типичный вид для диатомитов и практически идентичны друг другу: «аморфное гало» в виде широкого бесструктурного максимума в диапазоне углов  $2\Theta$  от  $20^\circ$  до  $26^\circ$  формируется опалом. Крупный пик в районе  $27,8^\circ$  указывает на присутствие плагиоклаза. Пики, идентифицирующие кварц, наблюдаются на всем промежутке углов  $2\Theta$  – от  $36^\circ$  до  $60^\circ$ . Глинистые минералы из группы смектита определяются по максимумам межплоскостных расстояний  $d$  – 1,502; 2,569; 4,48 и 14,7; каолинит – по максимуму  $d=7,23$ . ИК-спектры рассматриваемых пород практически идентичны: характерная для диатомитов полоса асимметричных валентных колебаний Si-O-Si четко выделяется в районе  $\approx 1105 \text{ см}^{-1}$  (рис. 4).

Результаты исследования общего химического состава палеоценовых и эоценовых диатомитов представлены в таблице. Палеоценовые диатомиты из обнажения Брусаяна характеризуются как более «чистые» разности с более высоким содержанием  $\text{SiO}_2$  и меньшим оксидов Al и Fe по сравнению с эоценовыми диатомитами крупных месторождений Зауралья: Камышловского (таблица) и Ирбитского [20].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кремнистые породы СССР / под ред. У.Г. Дистанова. – Казань: Татарское книжное издательство, 1976. – 412 с.
2. Унифицированные региональные стратиграфические схемы неогеновых и палеогеновых отложений Западно-Сибирской равнины: объяснительная записка / Ф.Г. Гурари, В.С. Волкова, А.Е. Бабушкин, А.Г. Головина, В.П. Никитин, А.И. Некрасов, А.В. Кривенцов, Ж.А. Доля, Ю.М. Колыхалов, З.Н. Гнибиденко; СНИИГГиМС. – Новосибирск, 2001. – 84 с.
3. Генералов П.П., Дрожачих Н.Б. Опалиты эоцена Западной Сибири // Опалиты Западной Сибири: труды ЗапСибНИГНИ. – Тюмень: ЗапСибНИГНИ, 1987. – С. 3–10.
4. Биостратиграфия морского палеогена Западно-Сибирской плиты / М.А. Ахметьев, Г.Н. Александрова, Э.О. Амон, В.Н. Беньямовский, Э.М. Бугрова, О.Н. Васильева, З.И. Глезер, В.И. Железко, Н.И. Запорожец, Г.Э. Козлова, И.А. Николаева, Т.В. Орешкина, Л.А. Панова, Э.П. Радионова, Н.И. Стрельникова, А.И. Яковлева // Стратиграфия. Геол. корреляция. – 2001. – Т. 9. – № 2. – С. 30–57.
5. Стрельникова Н.И. Палеогеновые диатомовые водоросли. – СПб: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 1992. – 312 с.

Диатомиты как ирбитской, так и серовской свит характеризуются схожими геохимическими спектрами (рис. 5) и в значительной степени обеднены редкими и рассеянными элементами относительно содержания в земной коре [21]. Значимые превышения кларковых значений ( $\text{КК}>2$ ) характерны для V, Cr, Eu, Tb для обеих пород и Cu, Zn для эоценовых диатомитов.

#### Выводы

Литология верхнепалеоценовых диатомитов схожа с литологией эоценовых. Основными компонентами в диатомитах являются опал и кварц с практически полным отсутствием кристобалита. Вместе с тем общее содержание минеральных фаз диоксида кремния в диатомите Брусаяна выше, а содержание глинистой компоненты ниже, чем в диатомитах ирбитской свиты близко расположенных Ирбитского и Камышловского месторождений. Высокое содержание терригенного песчаного, а не глинистого материала должно приниматься во внимание при планировании переработки породы.

В диатомитах с обнажения Брусаяна одновременно высокие содержания глауконита и терригенного материала (в диатомитах ирбитской свиты обычно 3–5 %, в палеоценовых – до 10 %). По всей видимости, повышенные содержания глауконита идентифицируют, что начало трансгрессивного цикла [22–25], обусловившее активизацию биогенного кремнеаккумуляции на рубеже палеоцена и эоцена, сопровождалось мощным эрозионным врезом и сносом обломочного материала. Изучение литологических особенностей диатомитов других обнажений пород серовской свиты позволит лучше понять закономерности распространения опал-кристобалитовых пород и особенности их седиментогенеза в Зауралье и планировать их использование отдельно от аналогичных пород эоценового возраста.

6. Kennett J.P., Stott L.D. Abrupt deep-sea warming, palaeoceanographic changes and benthic extinctions at the end of the Paleocene // Nature. – 1991. – V. 353. – P. 225–229.
7. Ахметьев М.А. Причинно-следственные связи и факторы глобальных биосферных перестроек в фанерозое // Современные проблемы геологии. – М.: Наука, 2008. – С. 463–492.
8. Гаврилов Ю.О. Глобальное биосферное событие на границе палеоцена и эоцена / Ю.О. Гаврилов, Е.А. Щербинина // Современные проблемы геологии. – М.: Наука, 2004. – С. 493–531.
9. Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present / J. Zachos, M. Pagani, L. Sloan, E. Thomas, K. Billups // Science. – 2001. – V. 292 (5517). – P. 686–693.
10. Barron J.A., Stickley C.E., Bukry D. Paleoclimatic, and paleoclimatic constraints on the global Eocene diatom and silicoflagellate record // Paleogeography, Palaeoclimatology, Paleoecology. – 2015. – V. 422. – P. 85–100.
11. Oreshkina T.V. Evidence of Late Paleocene–Early Eocene hyperthermal events in biosiliceous sediments of Western Siberia and adjacent areas // Austrian Journal of Earth Sciences. – 2012. – V. 105. – P. 145–153.
12. Oreshkina T.V., Oberhänsli H. Diatom turnover in the Early Paleocene diatomite of the Sengiley section, middle Povolzhie, Rus-

- sia: a response to the initial Eocene Thermal Maximum? // Geological Society of America Special Papers. – 2003. – V. 369. – P. 169–179.
13. Late Paleocene – Early Eocene diatoms and dinocysts from biosiliceous facies of the middle Trans-Urals region / G.N. Aleksandrova, T.V. Oreshkina, A.I. Iakovleva, E.P. Radionova // Stratigraphy and Geological Correlation. – 2012. – V. 20. – № 4. – P. 380–404.
  14. Пролиты Северного полушария в мелу и палеогене / Е.Ю. Барабошкин, Д.П. Найдин, В.Н. Беньямовский, А.Б. Герман, М.А. Ахметьев – М.: Изд-во геологического ф-та МГУ, 2007. – 182 с.
  15. Щадных Е.Ф. Отчет о разведочных работах на Камышловском месторождении диатомитов, проведенных в 1940 году / Геолмаркштрест, Урало-Сибирское отделение. – Свердловск, 1940. – Деп. в ФБУ «ТФГИ по УФО», № 013791.
  16. Analysis of geologic reference materials for REE and HFSE by inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) / I.V. Nikolaeva, S.V. Paleskii, O.A. Kozmenko, G.N. Anoshin // Geochemistry International. – 2008. – V. 46. – № 10. – P. 1016–1022.
  17. Определение основных и примесных элементов в силикатных породах методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой после сплавления с  $\text{LiBO}_2$  / И.В. Николаева, С.В. Палесский, О.С. Чирко, С.М. Черноножкин // Аналитика и контроль. – 2012. – Т. 16. – № 2. – С. 134–142.
  18. Швецов М. С. Петрография осадочных пород. – М.: Недра, 1958. – 412 с.
  19. Chenevière E. Sur un dépôt fossile marin à diatomées situé à Kamishev (Russie Centrale) // Bulletin de la Société française de microscopie. – 1934. – V. 3. – № 3. – P. 103–107.
  20. Смирнов П.В. Результаты комплексных исследований вещественного состава диатомитов Ирбитского месторождения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 6. – С. 93–104.
  21. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1995. – V. 59. – № 7. – P. 1217–1232.
  22. Banerjee S., Bansal U., Thorat A.V. A review on palaeogeographic implications and temporal variation in glaucony composition // Journal of Palaeogeography. – 2016. – V. 5. – № 1. – P. 43–71.
  23. Late Cretaceous transgression on a Cimmerian high (Neka Valley, Eastern Alborz, Iran): a geodynamic event recorded by glauconitic sands / F. Berra, A. Zanchi, M. Mattei, A. Nawab // Sedimentary Geology. – 2007. – V. 199. – P. 189–204.
  24. Compositional variability of glauconites within the Upper Cretaceous Karai Shale Formation, Cauvery Basin, India: implications for evaluation of stratigraphic condensation / S. Banerjee, U. Bansal, K. Pande, S.S. Meena // Sedimentary Geology. – 2016. – V. 331. – P. 12–29.
  25. Upper Eocene glauconites from the Bahariya depression: An evidence for the marine regression in Egypt / G. El-Habaak, M. Askalany, M. Galal, M. Abdel-Hakeem // Journal of African Earth Sciences. – 2016. – DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2016.01.013.

Поступила 28.09.2016 г.

#### Информация об авторах

**Смирнов П.В.**, заместитель директора НОЦ «Геология нефти и газа» Тюменского государственного нефтегазового университета.

**Константинов А.О.**, специалист НОЦ «Геология нефти и газа» Тюменского государственного нефтегазового университета.

UDC 552.086; 552.581

## COMPARATIVE STUDIES OF EOCENE AND PALEOCENE DIATOMITE FROM TRANS-URALS (ON THE EXAMPLE OF KAMYSHLOV DEPOSIT AND SECTION BRUSYANA)

Pavel V. Smirnov<sup>1</sup>,

geolog.08@mail.ru

Alexander O. Konstantinov<sup>1</sup>,

konstantinov.alexandr72@gmail.com

<sup>1</sup> Tyumen Industrial University,  
38, Volodarsky Street, Tyumen, 625000, Russia.

**Relevance of the discussed issue.** Typical siliceous section of Trans-Urals has a threefold structure as a rule: silicified opoka of the serov formation occurs at the bottom of the section, while diatomite and diatomaceous clays of irbit formation are deposited above. The main industrial deposits of diatomite in the region (Irbit, Kamyshlov, Potaninskoe deposits etc.) are confined to the lower Eocene Irbit formation, which is traditionally observed as the main productive horizon for this type of mineral raw materials. At the same time, development of the diatomite rock mass in Trans-Urals started in the terminal stage of the Paleocene, which is identified by the presence of diatom complex *Trinacria ventriculosa-Sheshukovia mirabilis*. Up to the present date the particular features of the lithology of serov formation Paleocene diatomites have not been practically studied, there is no information on clearly identified outcrops of serov diatomite within Trans-Urals, the industrial potential of these deposits has not been determined.

**The main aim** is a comparative study of the lithology, chemical and mineralogical composition of the Eocene Irbit formation diatomite (Kamyshlov quarry) and upper Paleocene Serov formation diatomite (section Brusyana).

**The methods used in the research:** field studies, X-ray diffraction, X-ray fluorescence analysis, infrared spectroscopy, and inductively coupled plasma mass spectrometry, scanning electron microscopy, lithological and petrographic analysis.

**The results.** For the first time the paper introduces the results of the complex studies of chemical and mineralogical composition, features of microstructure and lithology of the Paleocene diatomites from Trans-Urals on the example of rocks occurrence in the section Brusyana (Sverdlovsk region). It was found out that Paleocene diatomite form section Brusyana predominates over the Eocene diatomite and diatomaceous clays of most deposits in Trans-Urals in terms of SiO<sub>2</sub> content, the degree of diatom fossils preservation and microporosity and, accordingly, may be considered as a promising object for further exploration. Paleocene diatomite of serov formation is characterized by a higher content of glauconite and terrigenous material (up to 10 %), which, apparently, identifies activation of erosion within the sedimentary basin during the early stages of diatomite rock mass formation in Trans-Urals.

### Key words:

Opal-cristobalite rocks, diatomite, irbit formation, serov formation, Brusyana, Trans-Urals, Kamyshlov, lithology.

### REFERENCES

1. *Kremnistyye porody SSSR* [Siliceous rocks of the USSR]. Ed. by U.G. Distanov. Kazan, Tatar Publ., 1976. 412 p.
2. Gurari F.G., Volkova V.S., Babushkin A.E., Golovina A.G., Nikitin V.P., Nekrasov A.I., Kriventsov A.V., Dolya Zh.A., Kolykhanov Yu.M., Gnibidenko Z.N. *Unifitsirovannyye regionalnyye stratigraficheskie skhemy paleogenovykh i neogenovykh otlozheniy Zapadno-Sibirskoy ravniny: obyasnitel'naya zapiska i skhema* [Unified regional stratigraphic schemes of Paleogene and Neogene of the West Siberian Plain]. Novosibirsk, SNIIGGiMS Publ., 2001. 84 p.
3. Generalov P.P., Drozhashchikh N.B. Opalite eotsena Zapadnoy Sibiri [Eocene opalite of Western Siberia]. *Opalite Zapadnoy Sibiri. Trudy ZapSibNIGNI* [Opalite of Western Siberia. Proc. West-Siberian Research Geological Petroleum Institute]. Tyumen, 1987. pp. 3–10.
4. Akhmetev M.A., Aleksandrova G.N., Benyamovsky V.N., Zaporozhets N.I., Oreshkina T.V., Radionova E.P., Yakovleva A.I., Amon E.O., Vasileva O.N., Zhelezko V.I., Bugrova E.M., Glezer Z.I., Nikolaeva I.A., Panova L.A., Kozlova G.E., Strelnikova N.I. *Biostratigrafiya morskogo paleogena Zapadno-Sibirskoy plity* [Biostratigraphy of the marine paleogene in the West Siberian plate]. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2001, vol. 9, no. 2, pp. 132–158.
5. Strelnikova N.I. *Paleogenovyye diatomovyye vodorosli* [Paleogene diatoms]. St. Petersburg, SPBSU Publ., 1992. 312 p.
6. Kennett J.P.; Stott L.D. Abrupt deep-sea warming, palaeoceanographic changes and benthic extinctions at the end of the Paleocene. *Nature*, 1991, vol. 353, pp. 225–229.
7. Akhmetev M.A. Prichinno-sledstvennyye svyazi i faktory globalnykh biosfernykh perestroek v fanerozoie [Cause-and-effect relationships and factors of global biospheric reconstructions in the Phanerozoic]. *Sovremennyye problemy geologii* [Modern problems of geology]. Moscow, Nauka Publ., 2008. pp. 463–492.
8. Gavrilov Yu.O., Shcherbinina E.A. Globalnoe biosfernoe sobytie na granitse paleotsena i eotsena [Global biospheric event on the border of Paleocene–Eocene]. *Sovremennyye problemy geologii* [Modern problems of geology]. Moscow, Nauka Publ., 2004. pp. 493–531.
9. Zachos J., Pagani M., Sloan L., Thomas E., Billups K. Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present. *Science*, 2001, vol. 292, pp. 686–693.
10. Barron J.A., Stickley C.E., Bukry D. Paleoclimatic, and paleoclimatic constraints on the global Eocene diatom and silicoflagellate record. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Paleoecology*, 2015, vol. 422, pp. 85–100.
11. Oreshkina T.V. Evidence of Late Paleocene–Early Eocene hyperthermal events in biosiliceous sediments of western Siberia and adjacent areas. *Aust. J. Earth Sci.*, 2012, vol. 105, pp. 145–153.
12. Oreshkina T.V., Oberhänsli H. Diatom turnover in the Early Paleocene diatomite of the Sengiley section, middle Povolzhie, Russia: a response to the initial Eocene Thermal Maximum? *Geological Society of America Special Papers*, 2003, vol. 369, pp. 169–179.
13. Aleksandrova G.N., Oreshkina T.V., Yakovleva A.I., Radionova E.P. Late Paleocene–Early Eocene diatoms and dinocysts from biosiliceous facies of the middle Trans-Urals region. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2012, vol. 20, no. 4, pp. 380–404.

14. Baraboshkin E.Yu., Naydin D.P., Benyamovskiy V.N., German A.B., Akhmetev M.A. *Proliivy Severnogo polushariya v melu i Paleogene* [The Straits of the Northern Hemisphere in the Cretaceous and Paleogene]. Moscow, MGU Geological Faculty Publ., 2007. 182 p.
15. Shchadnykh E.F. *Otchet o razvedochnykh rabotakh na Kamyshlovskom mestorozhdenii diatomitov, provedennykh v 1940 godu* [Statement of exploration work on the field Kamyshlovsk diatomite in 1940]. Sverdlovsk, TFGI po UFO Publ., № 013791, 1940.
16. Nikolaeva I.V., Palesskii S.V., Kozmenko O.A., Anoshin G.N. Analysis of geologic reference materials for REE and HFSE by inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS). *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 10, pp. 1016–1022.
17. Nikolaeva I.V., Palessky S.V., Chirko O.S., Chernonozhkin S.M. Opredelenie osnovnykh i primesnykh elementov v silikatnykh porodakh metodom mass-spektrometrii s induktivno-svyazannoy plazmoy posle splavlenniya s LIBO<sub>2</sub> [Determination of major and trace elements by inductively coupled mass-spectrometry in silicate rocks after fusion with LIBO<sub>2</sub>]. *Analitika i control*, 2012, vol. 16, no. 2, pp. 134–142. In Rus.
18. Shvetsov M. S. *Petrografiya osadochnykh porod* [Petrography of sedimentary rocks]. Moscow, Nedra Publ., 1958. 412 p.
19. Chenevière E. Sur un dépôt fossile marin à diatomées situé à Kamishev (Russie Centrale). *Bulletin de la Société française de micropaléontologie*, 1934, vol. 3, no. 3, pp. 103–107.
20. Smirnov P.V. Results of comprehensive studies of diatomite material composition from Irbit deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 6, pp. 93–104. In Rus.
21. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, vol. 59, no. 7, pp. 1217–1232.
22. Banerjee S., Bansal U., Thorat A. A review on palaeogeographic implications and temporal variation in glaucony composition. *Journal of Palaeogeography*, 2016, vol. 5, no. 1, pp. 43–71.
23. Berra F., Zanchi A., Mattei M., Nawab A. Late Cretaceous transgression on a Cimmerian high (Neka Valley, Eastern Alborz, Iran): a geodynamic event recorded by glauconitic sands. *Sedimentary Geology*, 2007, vol. 199, pp.189–204.
24. Banerjee S., Bansal U., Pande K., Meena S.S. Compositional variability of glauconites within the Upper Cretaceous Karai Shale Formation, Cauvery Basin, India: implications for evaluation of stratigraphic condensation. *Sedimentary Geology*, 2016, vol. 331, pp. 12–29.
25. El-Habaak G., Askalany M., Galal M., Abdel-Hakeem M. Upper Eocene glauconites from the Bahariya depression: An evidence for the marine regression in Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 2016, DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2016.01.013.

Received: 28 September 2016.

#### Information about the authors

**Pavel V. Smirnov**, deputy director, Tyumen Industrial University.

**Alexander O. Konstantinov**, expert, Tyumen Industrial University.

УДК 556.06; 556; 556.166

## МЕТОДИКА ПРОГНОЗА ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ В БАССЕЙНЕ ВЕРХНЕГО АМУРА (НА ПРИМЕРЕ Р. ОНОН)

Лариошкин Виктор Викторович,

Viktor\_L88@mail.ru

Красноярский государственный аграрный университет,  
Россия, 660049, г. Красноярск, ул. Мира, 90.

**Актуальность работы.** Бассейн Амура относится к паводкоопасному региону. Дождевые наводнения в бассейне верхнего Амура, носящие катастрофический характер, наблюдались за последнее столетие 8 раз. Они охватывали одновременно огромные территории, сопровождалась человеческими жертвами, разрушением жилых и производственных зданий, инженерных коммуникаций. Эффективным способом борьбы с наводнениями является регулирование речного стока путем создания водохранилищ. Существующих водохранилищ в речной системе Амура не хватает, чтобы эффективно регулировать сток воды. Их строительство предусмотрено в планах дальнейшего освоения региона. Прогнозы притока паводковых вод являются одной из ключевых задач, позволяющих минимизировать ущерб от паводков и определить наиболее рациональный режим эксплуатации существующих и вновь создаваемых водохранилищ.

**Цель работы:** на примере реки Онон исследовать процессы формирования наводнений и разработать методику их краткосрочного прогноза в бассейне верхнего Амура.

**Методы исследования:** методы водного баланса, географо-гидрологические, статистические, математическое моделирование процессов формирования стока.

**Результаты.** Для реализации прогноза ежедневных расходов (уровней) воды дождевых паводков адаптирована концептуальная модель Д.А. Буракова, используемая в сибирских подразделениях Росгидромета. В качестве ландшафтно-гидрологической основы построения модели принято деление бассейна на районы и высотные зоны. Исходной территориальной единицей осреднения гидрометеорологических характеристик в бассейнах горных рек является высотная зона. В пределах высотной зоны территориальная неравномерность распределения запасов снега и емкостного поглощения воды учитывается с помощью распределений вероятности. Отрезки времени, в течение которых суточное поступление воды на поверхность бассейна превышает суточное испарение и просачивание, образуют последовательные паводкообразующие периоды. Для каждого суток паводкообразующего периода рассчитывается водоотдача высотных зон на основе инфильтрационно-емкостной модели Е.Г. Попова, гравитационный запас воды на склонах и приток в русловую сеть. В основу модели расчета добегающего притока воды по русловой сети положен интеграл свёртки (генетическая формула паводка). В результате выполненных исследований разработана методика прогноза ежедневных уровней воды в русловой системе р. Онон. Испытания методики в оперативном режиме в Читинском гидрометеорологическом центре показали ее эффективность.

### Ключевые слова:

Дождевые паводки, уровни воды, наводнения, концептуальная математическая модель формирования стока, гидрологические прогнозы.

### Введение

Высокие, порой катастрофические наводнения в бассейне Амура, вызванные муссонными дождями, – характерная особенность гидрологического режима этой великой реки. Практически каждый год на одном или нескольких ее притоках формируются опасные паводки. Если они проходят одновременно на большинстве притоков, то затопления охватывают огромные территории. В этих условиях изучение паводковых наводнений и разработка методов их прогноза представляют не только научный, но и практический интерес. Цель настоящей работы – исследование условий формирования дождевых паводков в теплое время года и разработка методики краткосрочных (1–7 суток) прогнозов уровня воды в бассейне Верхнего Амура на примере р. Онон.

### Объект исследования

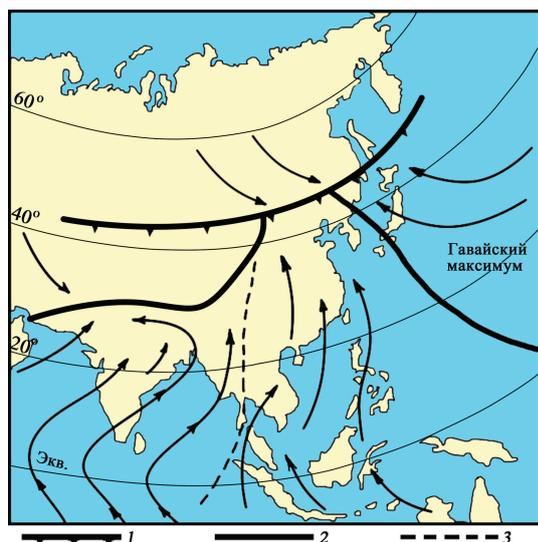
Река Онон берет начало в северных отрогах хребта Хэнтэй (Монголия), в 5 км к югу от горы Бэрэягин-Ям (высота 2099 м) [1, 2]. В пределах России Онон, сливаясь с рекой Ингода, образует реку Шилка, которая, в свою очередь, сливаясь с

рекой Аргунь, дает начало Амуру. Река Амур по размерам площади водосбора занимает четвертое место среди рек России (после Енисея, Оби и Лены) и десятое место среди рек мира.

Длина р. Онон составляет 1032 км. Длина верхней по течению монгольской части реки составляет 298 км, российская часть – 734 км. По условиям водного режима р. Онон относится к дальневосточному типу: сток весеннего половодья (апрель–май) составляет 10–15 % годового объема; в июне–октябре наблюдаются дождевые паводки, составляющие в годовом объеме 80–90 %; зимний сток (ноябрь–март) мал – около 5 %.

Таким образом, основным источником водного питания являются жидкие осадки, выпадающие в теплый период года. Их образование связано с летней дальневосточной депрессией, формирующейся в бассейне Амура и прилегающих районах Восточной Азии. Циклоническое поле образуется как из местных циклонов, так и из приходящих. Согласно [3, 4], пути циклонов и количество выпадающих осадков определяются особенностями расположения и интенсивностью развития фронтальной системы, разделяющей воздушные массы уме-

ренных широт и тропиков (рис. 1). При северном положении этой системы муссоны с Тихого и Индийского океанов могут достигать северных границ Монголии, включая бассейн Онона. При смещении фронтальной системы к югу наблюдается общее ослабление циркуляции и снижение количества осадков в районе Забайкалья, Монголии и северного Китая, тогда как область значительных осадков смещается в южные районы Китая.



**Рис. 1.** Приземные ветры, воздушные массы и фронты над муссонной Азией летом: 1 – среднее положение полярного фронта; 2 – среднее положение внутритропической зоны конвергенции; 3 – примерная граница между Индийским муссоном и Восточноазиатским муссоном ([4], Педелаборд, 1963)

**Fig. 1.** Surface winds, air masses and fronts over the summer monsoon Asia: 1 is the the medium position of the Polar Front; 2 is the medium position of the Intertropical Convergence Zone; 3 is the the approximate boundary between the Indian monsoon and East Asian monsoon ([4], P. Pedelabord, 1963)

В бассейне р. Онон ярко выражена высотная поясность в изменении речного стока [5–7]. На склонах гор, обращенных к влагоносным ветрам, средние годовые модули стока достигают 10 л/с·км<sup>2</sup>. Наименьшие модули (0–0,5 л/с·км<sup>2</sup>) приурочены к предгорным речным долинам и бессточным равнинам.

При выходе реки с гор на предгорный шлейф скачком возрастает мощность пролювия и делювия (с впитывающей способностью от значительной до провальной), в результате чего русловой сток по мере продвижения вниз по предгорному шлейфу непрерывно уменьшается. Наиболее ярко выражено явление русловых потерь стока на участке реки от с. Верхний Ульхун до с. Бытэв (протяженность 102 км), где средний многолетний расход воды р. Онон уменьшается от 248 до 197 м<sup>3</sup>/с. Речная долина представляет здесь чередование пойменных массивов шириной 1–6 км с ярко выраженной пойменной многоруканностью.

Для рассматриваемого участка прослеживается достаточно тесная линейная зависимость средних за месяц русловых потерь ( $\Delta Q$ , м<sup>3</sup>/с) от расхода воды во входном створе ( $Q$ , м<sup>3</sup>/с):  $\Delta Q = -0,197Q$ , (коэффициент парной корреляции  $r = 0,98$ ).

В пределах Онон-Борзинской степи (юго-восток российской части бассейна в засушливой зоне с годовым количеством осадков 250–300 мм) господствуют бессточные области. Модуль годового стока здесь снижается практически до нуля [7].

Представленные в табл. 1 величины осадков являются заниженными, так как пункты наблюдений расположены на дне речных долин и не отражают возрастающее количество осадков в горах. Кроме того, необходимо учитывать, что редкая сеть пунктов наблюдений за атмосферными осадками позволяет приблизительно оценить только ход осадков фронтального происхождения, распространяющихся на обширные площади, тогда как территориальное распределение локальных дождей (ливней) существующая сеть осадкомеров надежно учесть не в состоянии.

**Таблица 1.** Осадки, сток и коэффициент стока за апрель–октябрь (1980–2010 гг.)

**Table 1.** Precipitation, runoff and runoff coefficient for April–October (1980–2010)

Речной бассейн River basin	Площадь бассейна F, км <sup>2</sup> Area of the basin F, km <sup>2</sup>	Осадки X, мм Precipitation X, mm	Сток Y, мм Streamflow Y, mm	Кэф. стока Y/X Runoff coefficient Y/X
р. Онон – с. Верхний Ульхун Onon River – Verkhniy Ulkhun	45000	334	107	0,32
р. Онон – ст. Оловянная Onon River – Olovyannaya	75100	330	65	0,20
р. Онон – с. Чирон Onon River – Chiron	95900	328	62	0,19
р. Кыра – с. Кыра Kyra River – Kyra	5100	351	164	0,47
р. Иля – с. Иля Ilya River – Ilya	1370	330	100	0,30
р. Ага – с. Агинское Aga River – Aginskoye	2190	328	47	0,14

Примечание. Данные предоставлены Забайкальским гидрометеорологическим центром.

Note. The data are provided by the Zabaykalsky hydrometeorological centre.

В многолетней динамике (1951–2010 гг.) ход водности реки Онон характеризуется циклическими колебаниями, вызванными положением внутритропической зоны конвергенции, о которой сказано выше. На рис. 2 представлены временной ход модульных коэффициентов и нормированная интегральная кривая дождевого стока (суммарный сток за май–сентябрь). Можно выделить многоводные и маловодные периоды, которые на рисунке обозначены римскими цифрами (маловодные – I, III, V; многоводные – II, IV).

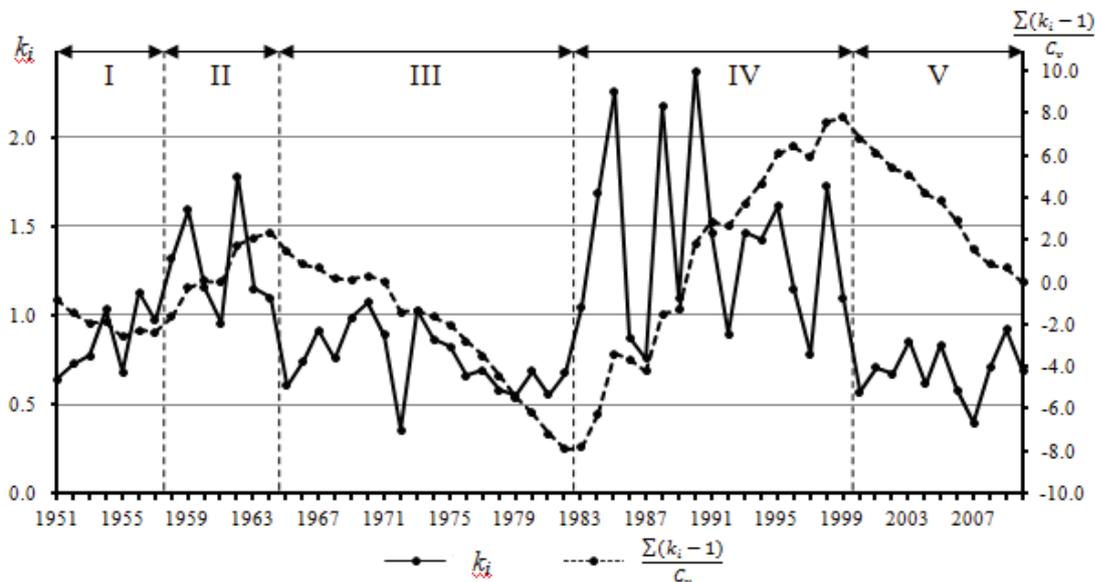


Рис. 2. Временной ход стока за теплый период (V–IX)

Fig. 2. Time course of a drain for the warm period (V–IX)

#### Постановка задачи

Для решения задачи прогноза характеристик паводка применяются два подхода. Первый из них – экспертно-статистический. Он подразумевает выбор с участием эксперта и с применением статистических методов оптимальных предикторов для прогнозируемой переменной и построение стохастической модели. Второй подход основывается на построении физико-математической модели формирования стока.

Анализ гидрометеорологической информации с применением различных методов позволил установить, что наиболее информативными предикторами прогностической модели являются паводкообразующие осадки ( $x$ ) и показатели предпаводочного увлажнения бассейнов ( $m_{t_d}$ ).

В расчетах стока дождевых паводков в качестве индекса предпаводочного увлажнения почвы  $m_{t_d}$  на момент начала дождя  $t_d$  использовались следующие косвенные показатели: 1) расход (уровень) воды в реке; 2) индекс предшествующих осадков [8]. Последний определяется по следующей усовершенствованной формуле:

$$m_{t_d} = (S + U)K^t + \sum_{j=0}^{t-1} x_{t-j} (K_{t-j})^j, \quad (1)$$

$$K_{t-j} = K_0 \exp[-c\theta_{t-j}],$$

где  $S$  – запас воды в снежном покрове в конце зимы;  $U$  – слой воды, заполняющий водоудерживающую емкость бассейна в конце зимы, определяемый по эмпирической зависимости от показателя осеннего увлажнения;  $K_0, c$  – коэффициенты;  $x_{t-i}$  – количество осадков за сутки  $t-i$ ,  $K_{t-i}$  – коэффициент, зависящий от среднесуточной температуры воздуха  $\theta$ .

Как показали расчеты, оба рассмотренных показателя предпаводочного увлажнения имеют примерно одинаковую репрезентативность.

Уравнения регрессии, выражающие зависимость слоя стока за паводок  $y$  от упомянутых аргументов, достаточно адекватно аппроксимируют реальные гидрометеорологические процессы, что подтверждается такими показателями корреляционной связи, как коэффициент множественной корреляции ( $R$ ), критерий качества прогностической зависимости ( $\sigma_0/\sigma$ ), и значениями  $t$ -статистик.

Для оценки критерия качества методики гидрологического прогноза используется отношение  $\sigma_0/\sigma$ , где  $\sigma_0$  – средняя квадратичная ошибка прогноза слоя стока  $y$ ,  $\sigma$  – его стандартное отклонение [9]. Методика считается «хорошей», если  $\sigma_0/\sigma$  меньше 0,50, «удовлетворительной» при  $\sigma_0/\sigma$  от 0,51 до 0,80 и «неудовлетворительной», если  $\sigma_0/\sigma$  больше 0,80.

Критерий « $t$ -статистика» численно равен отношению коэффициента регрессии к средней квадратичной ошибке его определения. Переменная считается репрезентативной, если « $t$ -статистика», рассчитанная при уровне значимости 5 %, достигает 2 и более [10. С. 341–343]. Данный критерий вычисляется программой Excel.

Например, для небольшой реки Ага – с. Агинское (бассейн р. Онон,  $F=2190$  км<sup>2</sup>) установлена связь паводочного стока с количеством осадков, сформировавших паводок (определены по среднему арифметическому из показаний двух пунктов: Агинское и Иля) и характеристикой увлажнения ( $m$ ) – уровнем воды р. Ага – с. Агинское в день выпадения осадков. Указанные предикторы входят в уравнение с достаточно высокими значениями

$t$ -статистик, что подтверждает их репрезентативность. Коэффициент множественной корреляции превышает 0,80 (табл. 2).

Для бассейна р. Онон до с. Верхний Ульхун ( $F=45000 \text{ км}^2$ ) максимальный расход воды дождевого паводка в основном определяется двумя предикторами: суммой осадков на метеостанциях Кыра и Мангут, расположенных на российской территории, и расходом воды на дату начала дождя.

Критерий качества прогноза по этой зависимости, построенной на обучающей выборке, включающей 51 совместную реализацию, составил 0,56. Коэффициент множественной корреляции – 0,83, средняя квадратичная ошибка  $\delta=0,11$ . Подчеркнем, что почти весь бассейн р. Онон до с. Верхний Ульхун располагается на территории Монголии.

Коэффициент множественной корреляции аналогичной зависимости для прогноза слоя паводочного стока р. Онон – ст. Оловянная ( $F=75100 \text{ км}^2$ ) составляет 0,84. Для этого бассейна осадки рассчитаны по данным семи пунктов наблюдений. За показатель предшествующих влагозапасов принят расход воды р. Онон у ст. Оловянная в день выпадения осадков. Похожие результаты получаются и по другим бассейнам исследуемой территории.

**Таблица 2.** Уравнение регрессии для прогноза паводочного стока р. Ага – с. Агинское

**Table 2.** Regression equation for forecasting flood flow on the Aга River – Aginskoe

Показатель увлажнения – уровень воды р. Ага – с. Агинское в день выпадения осадков Moisture index – water level in Aга River – Aginskoe in the day of rainfall		
$R=0,83, \sigma_0/\sigma=0,58$		
Коэффициенты регрессии зависимости regression coefficient $y=a_1x+a_2m+b$ $m$ – показатель увлажнения (уровень воды) $m$ is the moisture index (water level) $y=a_1x+a_2m+b$		$t$ -статистики коэффициентов регрессии $t$ -statistic of regression coefficients
$a_1$	-33,05	-4,68
$a_2$	0,27	5,95
$b$	0,14	4,41

Детальные физико-математические модели гидрологических прогнозов с распределенными параметрами на практике пока не используются. Дело в том, что модели этого типа не обеспечены необходимой гидрометеорологической информацией. По этой причине выпуск краткосрочных гидрологических прогнозов как в России, так и в США, Японии и странах Европы реализуется на основе построения моделей, в которых используются общие представления (концепции) о процессах формирования стока, эмпирические зависимости и осредненные по водосбору метеорологические характеристики [11–15]. Л.С. Кучмент назвал модели такого типа концептуальными [16]. Параметры концептуальных моделей представляют агрегированные константы, которые калибру-

ются методами оптимизации по данным многолетних гидрометеорологических наблюдений.

Для реализации прогноза ежедневных уровней воды дождевых паводков на р. Онон адаптирована концептуальная модель формирования стока, разработанная под руководством Д.А. Буракова, широко используемая в сибирских подразделениях Росгидромета [17, 18]. Ниже рассмотрим ряд принципиальных вопросов построения этой модели.

#### Ландшафтно-гидрологическая основа построения модели

Так как невозможно обеспечить огромное число локальных природных геосистем гидрометеорологическими данными, необходимо определить принцип разложения речного бассейна на гомогенные подобласти. В нашей модели главным принципом выделения гидрологических районов является пространственная коррелированность временных колебаний гидрометеорологических характеристик, позволяющая приближенно учесть их изменчивость с использованием данных наблюдений ограниченного числа пунктов. Учет пространственного разнообразия элементов ландшафта внутри каждого района осуществляется путем его расчленения на высотные зоны. Таким образом, горная территория достаточно крупного бассейна делится на районы и высотные зоны, тогда как в бассейнах малых и средних рек выделяются только высотные зоны. При таком подходе исходной территориальной единицей осреднения гидрометеорологических характеристик в бассейнах горных рек является высотная зона. В пределах высотной зоны территориальная неравномерность распределения запасов снега и емкостного поглощения воды учитывается с помощью распределений вероятности [19, 20].

#### Подмодель склонового притока в русловую сеть

Отрезки времени, в течение которых суточное поступление воды на поверхность бассейна  $x$  превышает суточное испарение  $z$  и просачивание  $I$ , образуют последовательные паводкообразующие периоды. Для каждого суток паводкообразующего периода рассчитывается водоотдача высотных зон  $u(t)$ , определяемая на основе инфильтрационно-емкостной модели Е.Г. Попова [9]. С этой целью рассчитывается интегральный слой воды  $H_{x_i}(t)$ , заполняющий водоудерживающую емкость за период от начала паводкообразующего дождя  $t_d$  до рассматриваемых суток  $t$ :

$$H_{x_i}(t) = \sum_{j=t_d}^t (x_j - z_j - I)_j, \quad (2)$$

где индекс  $i$  указывает на принадлежность к  $i$ -й высотной зоне.

Средний для  $i$ -й высотной зоны слой осадков  $x_i$  определяется путем арифметического осреднения показаний соответствующих пунктов наблюдений и введения поправки на высотный градиент осадков. Питание подземных вод  $I$  (мм/сут) прибли-

женно принимается равным суточному расходу воды в конце типовой кривой спада, характеризующему среднее пополнение подземного (базисного) стока.

Для каждого суточного интервала паводкообразующего периода рассчитывается интегральный слой водоотдачи  $i$ -й высотной зоны  $Y_i(t)$ , характеризующий количество воды, поступающей в речную сеть [9, 18]:

$$Y_i(t) = \alpha [H_{x_i}(t) - P_{d_i} th(H_{x_i}(t) / P_{d_i})], \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий долю постоянно бессточной площади в пределах высотной зоны, а также возможную долю русловых потерь стока, которые, как показано выше на примере участка р. Онон, увеличиваются с ростом количества стекающей воды;  $P_{d_i}$  – параметр емкостного поглощения воды, характеризующий размеры вододерживающей емкости для высотной зоны;  $th$  – функция гиперболического тангенса.

Для начала дождевого периода параметр емкостного поглощения  $P_{0d_i}$  определяется в зависимости от индекса предпаводочного увлажнения почвы по следующей эмпирической формуле [18]:

$$P_{0d_i} = P_{\max d} - C_d \lg(m_{t_d} + 1) - \text{grad} p_i \times \frac{\Delta H}{100}, \quad (4)$$

где  $P_{\max d}$  – параметр емкостного поглощения для наиболее сухих предшествующих условий;  $C_d$  – эмпирический коэффициент;  $m_{t_d}$  – рассмотренный выше индекс предпаводочного увлажнения почвы;  $\text{grad} p_i$  – высотный градиент  $P_{\max d}$ ;  $\Delta H$  – превышение  $i$ -й высотной зоны над минимальной высотой района.

Суточная водоотдача высотной зоны определяется как

$$u_i(t + \Delta t) = Y_i(t + \Delta t) - Y_i(t), \quad (5)$$

где  $\Delta t$  – расчетная единица времени;  $u_i(t + \Delta t)$  – водоотдача высотной зоны.

В основу подмодели расчета склонового притока в русловую сеть  $q(t)$  положена концепция динамического (гравитационного) запаса воды  $W(t)$  на склонах, который определяется из условия водного баланса. Предполагается, что в общем случае связь между  $q(t)$  и  $W(t)$  может быть не линейна [17, 18]:

$$W_i(t + \Delta t) = W_i(t) + u_i(t + \Delta t) - q_i(t + \Delta t), \quad (6)$$

$$q_i(t + \Delta t) = \alpha(t + \Delta t) \left[ \frac{W_i(t) + W_i(t + \Delta t)}{2} \right]^n, \quad (7)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий гидравлические условия склонового стока.

Общая структура модели формирования стока для высотной зоны бассейна включает блоки, представленные на рис. 3.

#### Вероятностная модель руслового добегания

В условиях недостаточного информационного обеспечения для расчета добегания воды по руслам используются так называемые «инженерные» методы, основанные на применении интеграла свёрт-

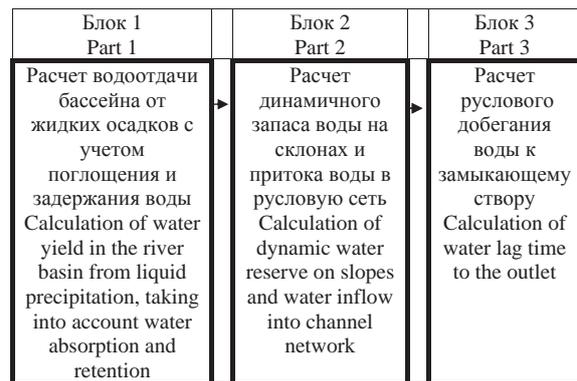


Рис. 3. Общая структура модели формирования стока [17]

Fig. 3. General structure of the flood flow formation model [17]

ки (генетическая формула паводка). В этих методах применяется кривая добегания  $f_j(\tau)$ , рассматриваемая как плотность распределения времени добегания элементарных объемов воды [17, 21, 22], поступающей со склонов в русловую сеть района  $j$  (или всего бассейна). Она аппроксимируется гибкими статистическими распределениями с оценкой моментов этих распределений по теоретическим коэффициентам, использующим агрегированные коэффициенты. Гидрограф притока в русловую сеть района (или бассейна)  $q_j(t)$  трансформируется в соответствующую составляющую расхода воды замыкающего створа  $Q_j^{(1)}(t)$  по выражению

$$Q^{(1)}(t + k\Delta t) = \sum_{j=1}^n \int_0^{k\Delta t} q_j(t + k\Delta t - \tau) f_j(\tau) d\tau, \quad (8)$$

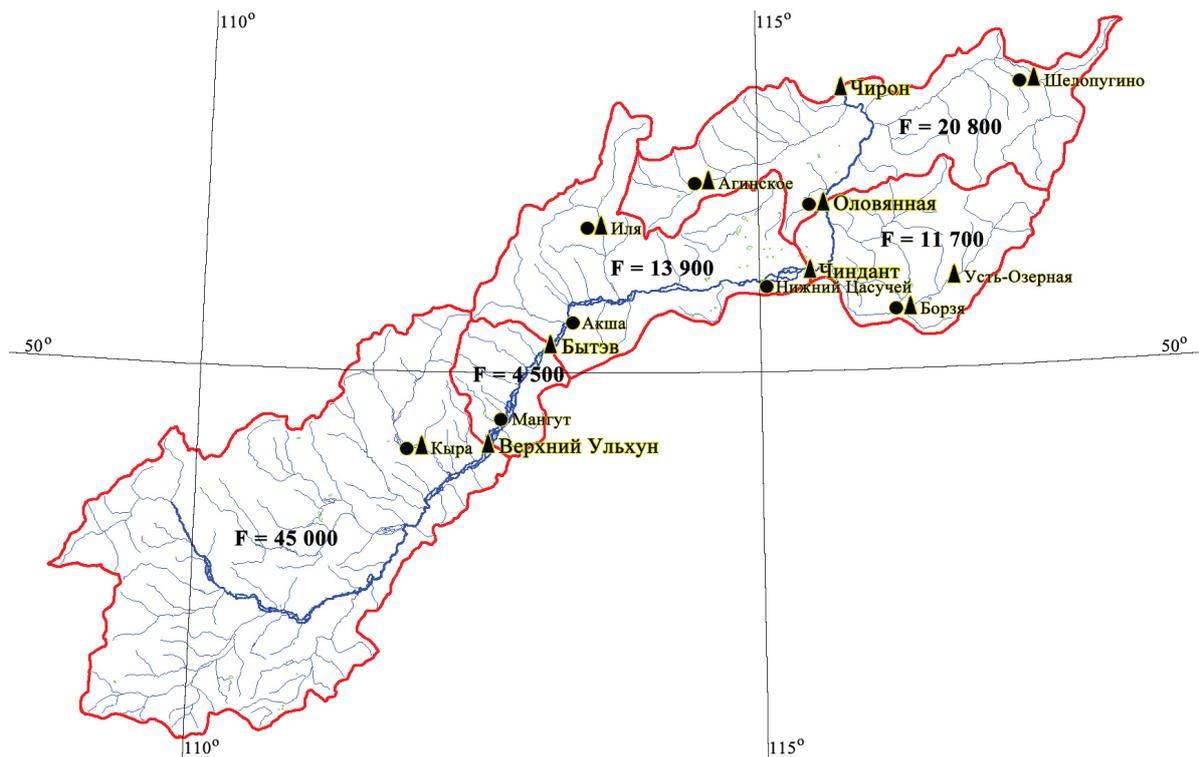
где  $t$  – дата выпуска прогноза;  $\Delta t$  – расчетная единица времени;  $k\Delta t$  – заблаговременность прогноза;  $j$  – номер района;  $n$  – количество районов в бассейне.

#### Учет уровней воды в речной сети на дату выпуска прогноза

Существенный вклад в повышение точности прогноза по уравнению (9) дает учет информации об уровнях воды  $H_i(t)$  в речной сети бассейна в 8 и 20 часов на дату выпуска прогноза, а также тенденций (изменений) уровней  $[H_i(t) - H_i(t - \Delta t)]$ . Тем самым учитываются начальные русловые запасы воды на эту дату. Выразив запас воды в русловой сети в зависимости от высот уровней воды  $H_i(t)$  в пунктах наблюдений речной системы, получим следующее уравнение [17, 18]:

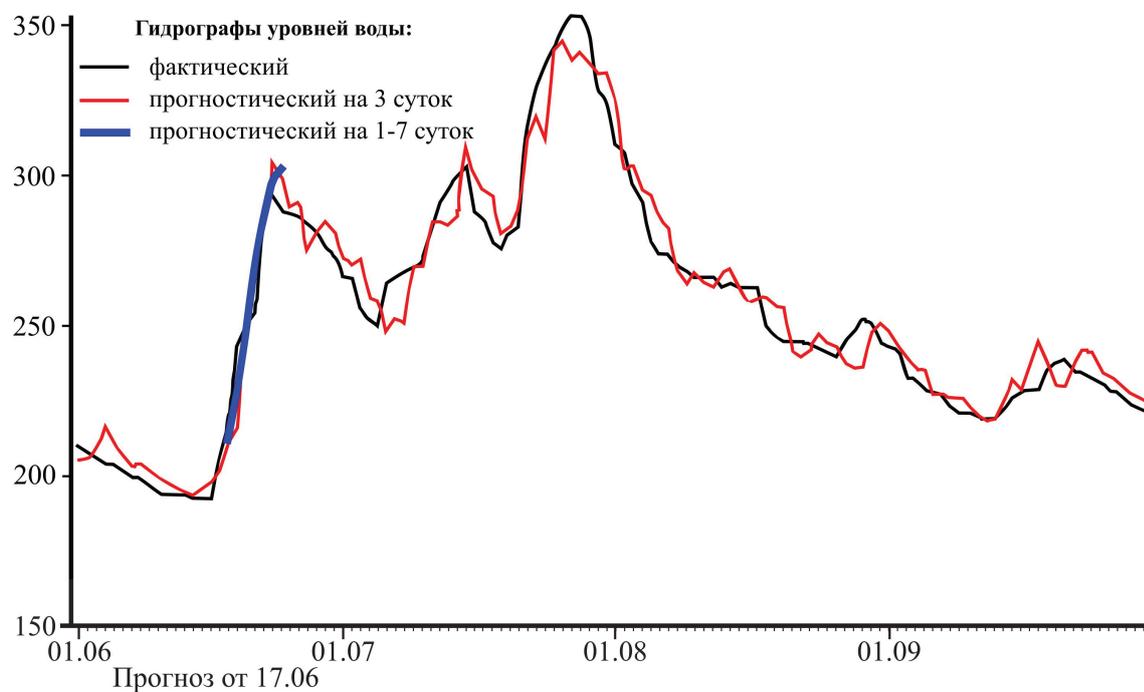
$$Q(t + k\Delta t) = \left( c_0 \sum_{j=1}^n \int_0^{k\Delta t} q_j(t + k\Delta t - \tau) f_j(\tau) d\tau + \sum_{i=1}^m c_i (H_i(t) - H_{\min,i})^{y1} + \sum_{i=1}^m c_{i+m} (H_i(t) - H_i(t - \Delta t)) \right) + Q_{\min}, \quad (9)$$

где  $Q(t + k\Delta t)$  – расход воды в замыкающем створе;  $c_i, y1$  – коэффициенты;  $H_{\min,i}$  – минимальный уро-



**Рис. 4.** Схема расположения пунктов наблюдений в бассейне р. Онон (● – гидрологические наблюдения; ▲ – метеорологические наблюдения; F – площадь водосбора района)

**Fig. 4.** Scheme of location of observation points in the basin of the Onon River (● are the hydrological observations; ▲ are the meteorological observations; F is the drainage area)



**Рис. 5.** Фактический (линия черного цвета) и прогностические (заблаговременность – 3 суток и 1–7 суток) гидрографы уровней воды р. Онон – ст. Оловянная за 2014 г.

**Fig. 5.** Real (the black line) and forecasted (forecast-time interval – 3 and 1–7 days) hydrographs of water levels in the Onon River – Olovyanaya for 2014

вень воды в  $i$ -м пункте речной системы, принятый за условный нуль отсчета;  $m$  – число пунктов наблюдений за уровнями воды;  $Q_{\min}$  – расход воды в замыкающем створе.

### Прогноз ежедневных уровней воды

Для построения модели прогноза и ее реализации используются данные наблюдений о ежедневных уровнях воды на гидрологических постах (с 21 марта по 30 октября в сроки 8 и 20 часов). Также необходимы ежедневные данные о суточных величинах осадков и температуре воздуха (рис. 4). В качестве начальных условий необходимо задать величину запасов воды в снежном покрове на конец второй декады марта.

Описание русловой сети, используемое для реализации вероятностной модели руслового добегания, представляется в виде схемы эквидистант – линий, соединяющих точки, находящиеся на одинаковом расстоянии вдоль русел до замыкающего створа. Между смежными эквидистантами выделяются площадки  $F_i$ . В качестве примера для районов бассейна р. Онон – ст. Оловянная в табл. 3 представлены: расстояния от нижних границ каждой площадки до замыкающего створа; расстояния по руслам между эквидистантами, выделяющими каждую площадку в бассейне или районе; относительные размеры площадок  $f_i = F_i/F$  для бассейна или района. В той же таблице показаны размеры относительных площадей высотных зон в выделенных районах.

Гидрометеорологические наблюдения за 1980–2010 гг., включающие как многоводные, так и маловодные годы, использовались нами для оценки параметров математической модели прогноза ежедневных расходов (уровней) воды методом оптимизации. Методика оптимизации параметров модели приводится в [17].

В табл. 4 представлены результаты оценки показателя качества методики прогнозов за 2000–2010 гг. (данные зависимых наблюдений).

Качество проверочных расчетов по материалам наблюдений характеризуется как «хорошее» и «удовлетворительное». Точность прогнозов снижается с приближением к границе с Монголией, по территории которой данные наблюдений за осадками в оперативном режиме не поступают в отдел гидрологических прогнозов Забайкальского УГМС. Так, для р. Онон – с. Верхний Ульхун у границы с Монголией критерии качества для всех заблаговременностей прогноза превышают 0,70 (методика прогноза «удовлетворительная»). Для пунктов, расположенных ниже по течению реки, критерии качества улучшаются, а для створа Чиндант они в ряде случаев меньше 0,50, т. е. методика оказывается «хорошей».

**Таблица 3.** Морфометрические характеристики районов р. Онон (площадь водосбора 75 100 км<sup>2</sup>)

**Table 3.** Morphometric characteristics of areas of the Onon River (drainage area is 75100 km<sup>2</sup>)

Характеристики Characteristics	Район 1 (Бытэв – Оловянная), площадь $F=25600$ км <sup>2</sup> Area 1 (Bytev – Olovyannaya), $F=25600$ км <sup>2</sup>					
	1		2			
Номер площадки между эквидистантами Number of the area between equidistant lines	1		2			
Расстояние площадки до замыкающего створа, км From the beginning of the area to outlet section, km	0		144			
Расстояние между эквидистантами, км Distance between equidistant lines, km	111		111			
Размеры площадки (доли единицы) Area size (portion of unit)	0,56		0,44			
Номер высотной зоны Number of high-rise zone	1	2	3	4	5	
Средняя высота зоны, м Average height of a high-rise zone, m	841	1050	1290	1530	1784	
Доля площади высотной зоны Share of the area of a high-rise zone	0,354	0,395	0,181	0,057	0,012	
Характеристики Characteristics	Район 2 (исток – с. Бытэв), площадь района $F=49500$ км <sup>2</sup> Area 2 (riverhead – Bytev), $F=49500$ км <sup>2</sup>					
	1		2		3	
Номер площадки между эквидистантами Number of the area between equidistant lines	1		2		3	
Расстояние площадки до замыкающего створа, км From the beginning of the area to outlet section, km	288		399		510	
Расстояние между эквидистантами, км Distance between equidistant lines, km	111		111		111	
Размеры площадки (доли единицы) Area size (portion of unit)	0,091		0,118		0,318	
Номер высотной зоны Number of high-rise zone	1	2	3	4	5	6
Средняя высота зоны, м Average height of a high-rise zone, m	935	1190	1430	1670	1910	2150
Доля площади высотной зоны Share of the area of a high-rise zone	0,167	0,390	0,283	0,125	0,033	0,003

**Таблица 4.** Критерий качества методики расчета (прогноза) ежедневных уровней воды на р. Онон за 2000–2010 гг.

**Table 4.** Criterion of quality of a calculation procedure (forecast) of daily water levels in the Onon River for 2000–2010.

Заблаговременность прогноза, сутки Forecast-time interval, day	1	2	3	4	5	6	7
р. Онон – с. Верхний Ульхун Onon River – Verkhniy Ulkhun	0,776	0,736	0,736	0,731	0,761	0,756	0,738
р. Онон – с. Бытэв Onon River – Bytev	0,731	0,637	0,616	0,625	0,656	0,672	0,670
р. Онон – с. Чиндант Onon River – Chindant	0,657	0,558	0,482	0,436	0,416	0,429	0,464
р. Онон – ст. Оловянная Onon River – Olovyannaya	0,806	0,752	0,726	0,704	0,684	0,677	0,681
р. Онон – с. Чирон Onon River – Chiron	0,850	0,779	0,722	0,673	0,650	0,627	0,623

#### Заключение

Результаты выполненных исследований использованы для создания оперативной системы

прогноза ежедневных уровней воды на р. Онон с заблаговременностью до 7 суток. Авторские испытания метода и оперативные прогнозы оказались успешными.

В летне-осенний период 2014 г. в Гидрометцентре ФГБУ «Забайкальское УГМС» проведены производственные испытания автоматизированного метода прогноза ежедневных уровней воды в бассейне р. Онон. Испытания подтвердили возможность использования метода с заблаговременностью прогнозов до 4–7 суток. Для задания температуры и осадков за период заблаговременности используются данные оперативных метеорологических прогнозов систем метеорологического прогнозирования, регулярно поступающие в Гидрометцентр Забайкальского УГМС. По р. Онон в пунктах с. Верхний Ульхун, с. Бытэв, с. Чиндант, ст. Оловянная, с. Чирон оправдываемость прогнозов за этот период по результатам испытаний составила от 92 до 100 %. На рис. 5 представлен пример прогноза за 2014 г. для р. Онон – ст. Оловянное.

Работа проведена в рамках ФЦП Росгидромета «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Полеванов В.К. К истокам Амура в «Страну непобедимых» // Наука и жизнь. – 2008. – № 10. – С. 110–117.
- Бассейн реки Амур в Забайкалье в вопросах и ответах / под ред. к.г.н. Н.В. Помазковой. – Чита: Экспресс-издательство, 2011. – 208 с.
- Марченко О.Ю., Бережных Т.В., Мордвинов В.И. Экстремальная водность реки Селенги и особенности летней циркуляции атмосферы // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 10. – С. 81–93.
- Педелаборд П. Муссоны. – М.: Изд-во иностранной лит-ры, 1963. – 195 с.
- Болгов М.В., Трубетцкова М.Д. О высотной зональности стока рек со значительной долей ледникового питания // Лед и снег. – 2011. – № 1. – С. 45–52.
- Bolgov M.V., Trubetskova M.D. The correlation between variations of climatic factors and zonal runoff of mountain rivers // Hydrology in a Changing World: Environmental and Human Dimensions. IAHS Red Books. – 2014. – № 363. – P. 96–101.
- Ресурсы поверхностных вод СССР / под ред. А.П. Муранова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1966. – Т. 18. – Вып. 1. – 800 с.
- Linsley R.K., Kohler M.A., Paulus J.L. Applied Hydrology. – New York: McGraw-Hill Publishing Co, 1949. – 689 p.
- Попов Е.Г. Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. – Л.: Гидрометеоиздат, 1963. – 395 с.
- Рождественский А.В., Чеботарев А.И. Статистические методы в гидрологии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 424 с.
- Vijay P. Singh. Computer Models of Watershed Hydrology. – Highlands Ranch: Water Resources Pubns, 2012. – 1144 p.
- The distributed model intercomparison project – Phase 2: motivation and design of the Oklahoma experiments / M. Smith, V. Koren, S. Reed, Z. Zhang, Yu. Zhang, F. Moreda, Z. Cui, N. Mizukami, E.A. Anderson, V.A. Cosgrove // J. Hydrol. – 2012. – V. 418–419. – P. 3–16.
- The distributed model intercomparison project – Phase 2: Experiment design and summary results of the western basin experiments / M. Smith, V. Koren, Z. Zhang, F. Moreda, Z. Cui, B. Cosgrove, N. Mizukami, D. Kitzmiller, F. Ding, S. Reed, E. Anderson, J. Schaake, Y. Zhang, V. Andréassiane, C. Perrine, L. Coron, A. Valéry, B. Khakbaz, S. Sorooshian, A. Behrangi, B. Imam, K.L. Hsu, E. Todini, G. Coccia, C. Mazzetti, E.O. Andres, F. Francés, I. Orozco, R. Hartman, A. Henkel, P. Fickenscher, S. Staggs // Journal of Hydrology. – 2013. – № 507. – P. 300–329.
- Karamouz E.A., Thomas C.P. Flood Forecasting: a Global Perspective. – Boulder: Academic Press, 2016. – 478 p.
- Karamouz M., Nazif S., Falahi M. Hydrology and Hydroclimatology. Principles and Applications. – Boca Raton: CRC Press (Taylor & Francis Group), 2013. – 716 p.
- Кучмент Л.С. Проблемы выбора моделей формирования стока для решения практических задач // Сб. научных трудов «Научное обеспечение реализации "Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г."». – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. – С. 74–81.
- Бураков Д.А., Кареева Е.Д., Шайдуров В.В. Математическое моделирование стока: теоретические основы, современное состояние, перспективы // Вестник Красноярского государственного университета (физико-математические науки). – 2006. – Вып. 4. – С. 3–19.
- Бураков Д.А., Авдеева Ю.В. Технология оперативных прогнозов ежедневных расходов (уровней) воды на основе спутниковой информации о заснеженности (на примере р. Нижней Тунгуски) // Метеорология и гидрология. – 1996. – № 10. – С. 75–87.
- Бураков Д.А., Горошко Н.В. Ландшафтно-гидрологическое районирование в моделях прогноза речного стока (на примере бассейна Верхней Оби) // Географическая наука, туризм и образование: современные проблемы и перспективы развития: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции. – Новосибирск, 2015. – С. 14–17.
- Semenova O., Beven K. Barriers to progress in distributed hydrological modeling // Hydrological Processes. – 2015. – № 29. – P. 2074–2078.

21. Бураков Д.А. К оценке параметров уравнений, аппроксимирующих кривую руслового добегаия // Водные ресурсы. – 1978. – № 4. – С. 21–24.
22. Nash J.E. Systematic determination of unit hydrograph parameters // J. Geophysical Research. – 1959. – V. 64. – № 1. – P. 111–115.

*Поступила 09.09.2016 г.*

#### **Информация об авторах**

**Лариошкин В.В.**, старший преподаватель кафедры природообустройства Института землеустройства кадастров и природообустройства Красноярского государственного аграрного университета.

UDC 556.06; 556; 556.166

## TECHNIQUE OF FORECASTING RAIN FLOOD IN THE UPPER AMUR BASIN (BY THE EXAMPLE OF THE ONON RIVER)

**Viktor V. Larioshkin,**

Viktor\_L88@mail.ru

Krasnoyarsk State Agrarian University,  
90, Mira street, Krasnoyarsk, 660049, Russia.

**Relevance.** The Amur basin is situated in a flood-inclined region. Over the course of the past century the disastrous pluvial flooding have occurred in the basin eight times. They covered huge territories, took peoples' lives and caused considerable damage to residential and industrial buildings, engineering systems. One of the efficient methods to struggle the floods is to regulate the river run-off developing flood-control reservoirs. The number of existing reservoirs on the Amur river system is insignificant to control efficiently the river run-off. Their building is tied with further region development. The forecast of flood water inflow allows minimizing damage and identifying the most rational reservoir release rules for the existing and expected reservoirs.

**Aim of the research** is to investigate the floods formation by the example of the Onon river and to develop the methods for short-term forecast of floods in the upper Amur basin.

**Research methods:** water balance method, geographical and hydrological methods, statistical method, mathematical modeling of run-off formation.

**Results.** The Burakovs' conceptual model is adapted to forecast daily rain floods water flows. This model is used by the Siberian department of the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring of Russia. The landscape and hydrological basis for this model is the basin division into areas and altitudinal zones. The altitudinal zone is an initial territorial unit of averaging the hydrological characteristics of mountain rivers. Within the altitudinal zone, territorial irregularity of snow cover distribution and capacitive water absorption are taken into account by probability distribution. The periods, when the diurnal water entry to the surface of the basin exceeds the diurnal evaporation and infiltration, compose successive flood-forming periods. For each day of a flood-forming period, the water yield is estimated using the Popovs' infiltration capacitive model. Besides, the gravitational water storage on the slopes and the inflow in the channel network are calculated. The method, describing water lag along the river channels, is based on applying the convolution integral (the genetic flood formula). As a result of the research, the author has developed the method of forecasting daily water levels in the Onon riverbed system. The method was applied by the Chita department of the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring of Russia and proved its efficiency.

### Key words:

Rain flood, water level, flood, conceptual mathematical model of flow formation, hydrological forecasts.

The research was carried out within the RosHydroMet Federal Special Purpose Program «Development of water utilization system in the Russian Federation in 2012–2020».

### REFERENCES

1. Polevanov V.K. K istokam Amura v «Stranu nepobedimyykh» [To the source of Amur to country of unconquerable]. *Nauka i zhizn*, 2008, no. 10, pp. 110–117.
2. *Bassein reki Amur v Zabaykale v voprosakh i otvetakh* [Basin of the Amur river in Transbaikalia in questions and answers]. Ed. by N.V. Pomazkova. Chita, Ekspres-Publ., 2011. 208 p.
3. Marchenko O.Yu., Bereznykh T.V., Mordvinov V.I. Ekstremalnaya vodnost reki Selengi i osobennosti letney tsirkulyatsii atmosfery [Extreme water content of the Selenga River and features of atmosphere summer circulation]. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2012, vol. 10, pp. 81–93.
4. Pedelabord P. *Mussony* [Monsoons]. Moscow, Foreign Languages Publ., 1963. 195 p.
5. Bolgov M.V., Trubetskova M.D. O vysotnoy zonalnosti stoka rek so znachitelnoy doley lednikovogo pitaniya [On high-rise zonality of drain of the rivers with a considerable share of glacier-derived nourishment]. *Ice and Snow*, 2011, no. 1, pp. 45–52.
6. Bolgov M.V., Trubetskova M.D. The correlation between variations of climatic factors and zonal runoff of mountain rivers. *Hydrology in a Changing World: Environmental and Human Dimensions*. IAHS Red Books, 2014, no. 363, pp. 96–101.
7. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR* [Surface water resources of the USSR]. Ed. by A.P. Muranov. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1966. P. 18, vol. 1, 800 p.
8. Linsley R.K., Kohler M.A., Paulus J.L. *Applied Hydrology*. New York, McGraw-Hill Publ. Co., 1949. 689 p.
9. Popov E.G. *Voprosy teorii i praktiki prognozov rechnogo stoka* [Theory and practice of river flow forecasts]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1963. 395 p.
10. Rozhdestvenskiy A.V., Chebotarev A.I. *Statisticheskie metody v gidrologii* [Statistical methods in hydrology]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974. 424 p.
11. Vijay P. Singh *Computer Models of Watershed Hydrology*. Highlands Ranch, Water Resources Publ., 2012. 1144 p.
12. Smith M., Koren V., Reed S., Zhang Z., Zhang Yu., Moreda F., Cui Z., Mizukami N., Anderson E.A., Cosgrove B.A. The distributed model intercomparison project – Phase 2: motivation and design of the Oklahoma experiments. *Journal of Hydrology*, 2012, vol. 418–419, pp. 3–16.
13. Smith M., Koren V., Zhang Z., Moreda F., Cui Z., Cosgrove B., Mizukami N., Kitzmiller D., Ding F., Reed S., Anderson E., Schake J., Zhang Y., Andréassiane V., Perrine C., Coron L., Valéry A., Khakbaz B., Sorooshian S., Behrangi A., Imam B., Hsu K.L., Todini E., Coccia G., Mazzetti C., Andres E.O., Francés F., Orozco I., Hartman R., Henkel A., Fickenscher P., Staggs S. The distributed model intercomparison project – Phase 2: Experiment design and summary results of the western basin experiments. *Journal of Hydrology*, 2013, no. 507, pp. 300–329.

14. Karamouz E.A., Thomas C.P. *Flood Forecasting: A Global Perspective*. Boulder, Academic Press, 2016. 478 p.
15. Karamouz M., Nazif S., Falahi M. *Hydrology and Hydroclimatology. Principles and Applications*. Boca Raton, CRC Press (Taylor & Francis Group), 2013. 716 p.
16. Kuchment L.S. Problemy vybora modeley formirovaniya stoka dlya resheniya prakticheskikh zadach [Problems of choosing the models of drain formation to solve practical tasks]. *Sbornik nauchnykh trudov: Nauchnoe obespechenie realizatsii «Vodnoy strategii Rossiyskoy Federatsii na period do 2020 goda»* [Collection of scientific works: scientific ensuring of implementation of «The water strategy of the Russian Federation for the period till 2020»]. Petrozavodsk, KarRC RAS, 2015. pp. 74–81.
17. Burakov D.A., Karepova E.D., Shaydurov V.V. Matematicheskoe modelirovanie stoka: teoreticheskie osnovy, sovremennoe sostoyaniye, perspektivy [Mathematical modeling of water flow: theoretical foundations, current status and prospects]. *Bulletin of the Krasnoyarsk State University (Physics and mathematics)*, 2006, vol. 4, pp. 3–19.
18. Burakov D.A., Avdeeva Yu.V. Tekhnologiya operativnykh prognozov ezhdnevnykh raskhodov (urovney) vody na osnove sputnikovoy informatsii o zasnezhennosti (na primere r. Nizhney Tunguski) [Technique of real-time forecasts of daily water consumption (levels) based on satellite data on snow cover (by the example of the river Nizhnyaya Tunguska)]. *Meteorology and Hydrology*, 1996, no. 10, pp. 75–87.
19. Burakov D.A., Goroshko N.V. Landshaftno-gidrologicheskoe rayonirovanie v modelyakh prognoza rechnogo stoka (na primere basseyna Verkhney Obi) [Landscape-hydrological regionalization in models of forecasting river flow (by the example of the Upper Ob Basin)]. *Materialy IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Geograficheskaya nauka, turizm i obrazovanie: sovremennyye problemy i perspektivy razvitiya* [Materials of the IV All-Russian scientific and practical conference. Geographical science, tourism and education: modern problems and prospects of development]. Novosibirsk, 2015. pp. 14–17.
20. Semenova O., Beven K. Barriers to progress in distributed hydrological modeling. *Hydrological Processes*, 2015, no. 29, pp. 2074–2078.
21. Burakov D.A. K otsenke parametrov uravneniy, approksimiruyushchikh krivuyu ruslovogo dobeganiya [Estimation of the parameter of equations approximating the curve of flow lag channel]. *Vodnye resursy*, 1978, no. 4, pp. 21–24.
22. Nash J.E. Systematic determination of unit hydrograph parameters. *Journal of Geophysical Research*, 1959, vol. 64, no. 1, pp. 111–115.

*Received: 9 September 2016.*

#### Information about the authors

**Viktor V. Larioshin**, senior lecturer, Krasnoyarsk State Agrarian University.

**Компьютерная верстка** *О.Ю. Аршинова*  
**Корректурa** *Д.В. Заремба*  
**Перевод на английский язык** *С.В. Жаркова*  
**Дизайн обложки** *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива  
*Валерия Касаткина*

Руководство для авторов и образец оформления статьи: [izvestiya.tpu.ru](http://izvestiya.tpu.ru)

Подписано к печати 28.11.2016. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 13,49. Уч.-изд. л. 12,20.  
Заказ 469-16. Тираж 500 экз.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ