

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 328, № 7, 2017

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА.
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Редакционная коллегия

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. 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, 2017

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
- Инженерная геология Евразии и окраинных морей.

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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

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

Volume 328, № 7, 2017

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

Editorial Board

Semiletov I.P., 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, 2017

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;
- Geo-engineering of Eurasia and marginal sea.

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

СОДЕРЖАНИЕ

- Изотермическое моделирование аэродинамической структуры закрученного течения в двухступенчатом горелочном устройстве** 6
Алексеенко С.В., Шторк С.И., Юсупов Р.Р.
- Тектоно-седиментационная интерпретация данных геотермии при выявлении и оценке позднеэоценовой эрозии на арктических месторождениях углеводородов (п-ва Ямал)** 19
Исаев В.И., Старостенко В.И., Лобова Г.А., Фомин А.Н., Исагалиева А.К.
- Определение кремния в природных водах спектрофотометрическим методом с применением современных способов пробоподготовки** 32
Бекбулатова И.А., Скворцова Л.Н., Щёголева И.С.
- Устранение неопределенностей при решении задач воздействия на призабойную зону скважин** 40
Мухаметшин В.В.
- К вопросу обоснования режимов испытаний ампульных экспериментальных устройств в исследовательском реакторе** 51
Скаков М.К., Мухамедов Н.Е., Дерявко И.И.
- Химический состав нефти Крапивинского месторождения (сообщение 3)** 59
Сергун В.П., Чешкова Т.В., Сагаченко Т.А., Мин Р.С.
- Оценка оползневой опасности береговых склонов на территории города Барнула** 67
Семикина С.С., Сотников П.В.
- Моделирование полупроводникового детектора из особо чистого германия** 76
Алейников Ю.В., Попов Ю.А., Прозорова И.В., Прозоров А.А.
- Приготовление и коррекция показателей бурового раствора технологией и оборудованием ВСМА** 86
Данекер В.А., Рикконен С.В.
- Уран и торий в почвенном покрове Иркутско-Ангарской промышленной зоны (Прибайкалье)** 93
Гребенщикова В.И., Грицко П.П., Кузнецов П.В., Дорошков А.А.
- Проблемы рудной геологии и человеческий фактор. Часть 1. Минералого-петрохимическая зональность околожилных метасоматических ореолов в мезотермальных месторождениях золота: теория, эксперимент, природа** 105
Кучеренко И.В.

CONTENTS

- Isothermal modeling of swirling flow aerodynamic structure in a two-stage burner** 6
Aleksenko S.V., Shtork S.I., Yusupov R.R.
- Tectonic-sedimentation interpretation of the geothermics data when identifying and assessing the late Eocene erosion on the arctic hydrocarbon fields (Yamal peninsula)** 19
Isaev V.I., Starostenko V.I., Lobova G.A., Fomin A.N., Issagaliyeva A.K.
- Determination of silicon in natural waters by spectrophotometry using modern methods of sample preparation** 32
Bekbulatova I.A., Skvortsova L.N., Shchegoleva I.S.
- Eliminating uncertainties in solving bottom hole zone stimulation tasks** 40
Mukhametshin V.V.
- On the issue of substantiation of test modes for ampoule experimental device in research reactor** 51
Skakov M.K., Mukhamedov N.E., Deryavko I.I.
- Chemical composition of petroleum from Krapivinskoye oilfield (message 3)** 59
Sergyn V.P., Cheshkova T.V., Sagachenko T.A., Min R.S.
- Assessment of landslide hazard of the sloping shoreline on the territory of Barnaul** 67
Semikina S.S., Sotnikov P.V.
- Modeling semiconductor detector of especially pure germanium** 76
Aleynikov Yu.V., Popov Yu.A., Prozorova I.V., Prozorov A.A.
- Preparation and correction of drilling mud by technology and equipment of vibro-jet-magnetic activation** 86
Daneker V.A., Rikkonen S.V.
- Uranium and thorium in soil cover of the Irkutsk-Angarsk industrial zone (Baikal region)** 93
Grebenshchikova V.I., Gritsko P.P., Kuznetsov P.V., Doroshkov A.A.
- Ore geology problems and the human factor. Part 1. Mineral-petrochemic zoning of the near-veins metasomatic aureoles in the mesothermal gold deposits: theory, experiment, nature** 105
Kucherenko I.V.

УДК 532.5

ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ЗАКРУЩЕННОГО ТЕЧЕНИЯ В ДВУХСТУПЕНЧАТОМ ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ

Алексеев Сергей Владимирович^{1,2},
aleks@itp.nsc.ru

Шторк Сергей Иванович^{1,2},
shtork@itp.nsc.ru

Юсупов Роман Равильевич^{1,2},
romansemsk@yandex.ru

¹ Институт теплофизики СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 1.

² Новосибирский государственный университет,
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2.

Актуальность работы обусловлена широким использованием взаимодействующих закрученных потоков в устройствах для гашения энергии и в вихревых камерах сгорания. Чтобы оптимизировать конструкцию таких устройств, необходимо понимание структуры течения и механизмов взаимодействия соосных закрученных потоков. Применительно к горелочным устройствам данные исследования необходимы для наиболее эффективного сжигания топлива, уменьшения загрязняющих выбросов продуктов сгорания и увеличения эксплуатационного срока службы камер сгорания.

Цель работы: экспериментальное исследование аэродинамической структуры закрученного течения в изотермической модели двухступенчатой вихревой камеры сгорания. Основное внимание уделено процессу смешения потоков двух последовательно соединённых тангенциальных завихрителей первой и второй ступеней рабочего участка.

Методы исследования: визуализация течения с использованием цифровой высокоскоростной камеры для исследования различных режимов работы вихревого горелочного устройства и лазерно-доплеровская анемометрия для получения профилей осреднённых по времени осевой и тангенциальной компонент скорости, а также их пульсационных составляющих (среднеквадратичные отклонения).

Результаты. В случае режима с созакруткой потоков между двумя ступенями рабочего участка было выявлено образование вторичной неустойчивости течения в виде прецессирующего вихря. При режиме с противокруткой обнаружено эффективное смешение закрученных потоков. Исходя из результатов проведенных изотермических опытов можно заключить, что вариант с противокруткой является более предпочтительным для использования в двухступенчатой горелке в плане возможности более быстрого смешения горелочных струй первой и второй ступеней. Результирующее течение характеризуется более равномерным заполнением внутреннего объема устройства в сочетании с устойчивой выраженной закруткой потока, которая должна увеличивать время пребывания частиц топлива в зоне активного горения и, соответственно, полноту его выгорания. Последний фактор достигается без развития сильной гидродинамической неустойчивости течения, характерной для аппаратов с сильной закруткой потока.

Ключевые слова:

Вихревые горелки, соосные закрученные потоки, скоростная визуализация, лазерно-Допплеровская анемометрия, прецессирующее вихревое ядро.

Введение

Закрученные потоки широко применяются во многих технических устройствах, в том числе для смешения жидкостей, генерации аэрозолей, распыливания жидкого топлива и стабилизации факела. В закрученных потоках интенсифицируются процессы тепло- и массообмена, что используется для охлаждения, нагрева и очистки рабочих жидкостей и газов, для разделения суспензий, сепарации и классификации сыпучих материалов. В настоящее время одной из весьма интересных задач в области закрученных течений является изучение поведения взаимодействующих соосных закрученных потоков [1]. Актуальность подобных исследований вызвана, в частности, применением встречных закрученных потоков в устройствах для гашения энергии [2, 3] и вихревых камерах сгорания [4–9]. Чтобы оптимизировать конструк-

цию таких устройств, необходимо понимание структуры течения и механизмов взаимодействия контрзакрученных потоков. Применительно к горелочным устройствам данные исследования необходимы для наиболее эффективного сжигания топлива, уменьшения загрязняющих выбросов продуктов сгорания и увеличения эксплуатационного срока службы камер сгорания.

Настоящая работа посвящена изотермическому моделированию аэродинамической структуры потока в двухступенчатом вихревом горелочном устройстве с тангенциальной закруткой потока. Ввиду простоты геометрии горелки с тангенциальным или улиточным завихрителем часто используются на практике, например, для сжигания мелкодисперсного пылеугольного топлива [10]. В свою очередь двухступенчатая конструкция горелок может, например, использоваться в схемах сжигания

пылеугольного топлива, когда в первую поджиговую ступень подается более реакционноспособное топливо, подвергнутое механохимической активации, а во вторую – более низкорекреационное угольное топливо, подготовленное обычным способом [11].

Изотермическое моделирование, которое позволяет с относительно небольшими затратами определить направление оптимизации по режимам работы и геометрии рабочего участка, широко использовалось ранее для разработки энергетических установок [12]. Данный подход остается актуальным и в настоящее время, дополненный возможностями современных бесконтактных оптических систем (лазерно-Допплеровская анемометрия (ЛДА), полевые измерители скорости (PIV)) для детального анализа внутренней структуры потоков [13, 14]. При этом физический эксперимент обеспечивает также эмпирическую информацию для верификации результатов математического моделирования [15, 16]. В этом контексте результаты настоящих исследований, проведенных с применением ЛДА, будут использоваться для сопоставления с данными, полученными с помощью коммерческого численного кода. Дальнейшие исследования будут также включать опыты на огневых установках для проверки обоснованности выводов, сделанных на основе изотермических экспериментов.

Методика эксперимента

Гидродинамический стенд и рабочий участок

Изотермическое моделирование двухступенчатого горелочного устройства проводилось с использованием воды в качестве рабочей жидкости, что дает более широкие возможности в проведении наглядной визуализации потока [15]. Модель горелочного устройства – 6 подключалась к замкнутому гидродинамическому контуру (рис. 1), состоящему из бака – 1 емкостью 0,5 м³, центробежного насоса Х100–80–160Т153 – 2 с максимальными расходом и напором 100 м³/ч и 4 атм., соответственно, линий подачи жидкости в первую и вторую ступени с устройствами измерения расходов по каждой линии (4 – расходомерная шайба, 5 – вихреакустический расходомер Метран-300ПР). Суммарный расход регулировался с помощью частотного преобразователя Веспер Е2–8300–030Н – 3, а расходы через каждую линию – с помощью регулировочных кранов. Для монтажа гидродинамического контура использованы подводящие трубы и разборные компрессионные соединительные элементы, изготовленные из полиэтилена низкого давления (ПЭ 100, ПЭ 80).

Кроме соотношения расходов между ступенями, была предусмотрена возможность изменения закрутки потока во второй ступени модели перекрытием или открытием соответствующих подводящих патрубков с помощью запорных кранов. Суммарный расход в рабочем участке для данной серии экспериментов был порядка 10 м³/ч, что со-

ответствовало турбулентному режиму течения с числом Рейнольдса порядка 10⁵. Эти условия, характерные для работы практических устройств, соответствуют области автомодельности, когда структура течения не зависит от числа Рейнольдса [12, 15].

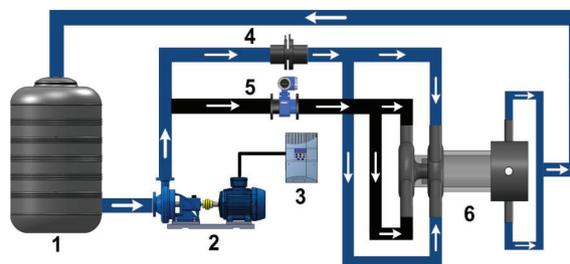


Рис. 1. Схема гидродинамического стенда для моделирования аэродинамической структуры закрученного течения в двухступенчатой горелке: 1 – бак, 2 – насос с двигателем мощностью 22 кВт, 3 – частотный преобразователь, 4 – расходомерная шайба, 5 – вихревой расходомер, 6 – рабочий участок

Fig. 1. Scheme of a hydrodynamic bench for modeling the aerodynamic structure of a swirling flow in a two-stage burner: 1 – tank, 2 – pump with 22 kW engine, 3 – frequency converter, 4 – flow meter, 5 – vortex flow meter, 6 – working area

В качестве рабочего участка используется гидродинамическая модель двухступенчатой вихревой горелки (рис. 2). Для обеспечения оптического доступа рабочая камера изготовлена из прозрачного материала – оргстекла. Входная часть камеры состоит из двух последовательно соединённых завихрителей диаметром 185 мм, в которых реализована закрутка потока при помощи тангенциального подвода через патрубки с внутренним диаметром 40 мм. Поток жидкости получает закрутку на завихрителе – 1 и дальше, пройдя через сопло, попадает в область внезапного расширения. В дальнейшем в этой области он взаимодействует с потоком, который получает закрутку на втором завихрителе – 3. В зависимости от способа подачи жидкости на второй завихрителе создаётся как созакрутка (белые стрелки), так и противозакрутка (чёрные стрелки) двух потоков, сформированных завихрителями первой и второй ступеней рабочего участка. Результирующий поток из цилиндрической области диаметром 104 мм – 4 поступает в выходную секцию – 5, откуда отводится через четыре симметрично расположенных патрубка с внутренним диаметром 26 мм.

Оптические системы для анализа структуры течения

В процессе опытов на изотермической модели проводилась визуализация потока. В качестве маркеров течения использовались мелкие пузырьки воздуха, которые подсвечивались источником света (светодиодный прожектор для анализа общей картины течения или узкий световой «нож», формируемый разверткой на цилиндрической линзе лазерного пучка от твердотельного лазера,

для визуализации структуры течения в конкретном сечении рабочего участка). Воздух для визуализации подавался на вход центробежного насоса, в котором происходило диспергирование крупных пузырей на более мелкие со средним размером порядка 1 мм. Такие пузыри достаточно точно отслеживают движение потока и, кроме того, за счет эффекта полного внутреннего отражения дают яркие, хорошо заметные треки при освещении источником света. Картина течения регистрировалась на скоростную цифровую камеру PCO 1200hs с максимальным разрешением 1280×1024 пикселей при частоте кадров до 636 Гц.

Для получения количественной информации о поле течения использовался двухкомпонентный лазерно-Доплеровский анемометр (ЛДА) ЛАД-06и, работающий на обратном рассеянии. Оптический блок имеет в своем составе полупроводниковый лазерный источник мощностью 70мВт, излучающий на длине волны 684 нм, и дифференциальную формирующую оптику с фокусным расстоянием 500 мм. Для обеспечения чувствительности системы к направлению скорости применяется частотный сдвиг одного из лазерных пучков на 80 МГц с помощью ячейки Брэгга. Оптический блок, формирующий измерительный объем с размерами 0,05×0,05×1 мм (в воздухе), установлен на 3-координатное программируемое перемещающее устройство с точностью позиционирования измерительного объема не менее 0,1 мм. В качестве трассеров потока при ЛДА-измерениях использовались полистирольные сферические частицы размером 20 мкм с нейтральной плавучестью. В процессе измерений в каждой измерительной точке накапливалась статистика из 5000 доплеровских «вспышек» (прохождение трассеров через измерительный объем), что обеспечивает достоверный интервал не меньше 95 % [17].

Следует заметить, что при измерениях с использованием ЛДА в цилиндрическом участке зондирующие лучи, формирующие измерительный объем, подвержены оптической аберрации вследствие того, что они пересекают криволинейные границы раздела сред с различной оптической плотностью [18]. Этот эффект затрудняет измерение поперечной тангенциальной компоненты скорости, когда закрученный поток зондируется вдоль диаметральной линии от передней стенки к тыльной (рис. 2). Причем эффект искажения тем сильнее, чем на большую глубину от ближней боковой стенки цилиндрического канала перемещается измерительный объем. Сильным искажениям также подвержены зондирующие пучки при измерениях радиальной компоненты скорости, когда необходимо перемещать измерительный объем в ортогональном направлении от центра канала вверх и вниз. Только измерение осевой компоненты скорости вдоль горизонтальной меридиональной плоскости не сопряжено с проблемной оптической искажений. Отметим, что в нашем случае эффект оптических искажений существенно уменьшен вследствие двух обстоятельств – плоская наружная граница (рабочий участок с внешней стороны выполнен в виде четырехгранной призмы, а измерение ведется через одну из плоских граней) и вода внутри канала, отличие оптической плотности которой от материала стенок (оргстекло) относительно невелико. Тем не менее, в данной работе не представлены результаты по радиальной компоненте скорости, поскольку оптические искажения при удалении измерительного объема вверх/вниз от продольной оси канала настолько сильные, что приводят к пространственному рассогласованию зондирующих пучков, препятствующему их пересечению. Также, как будет видно из представленных ниже результатов, из-за сильных оптических

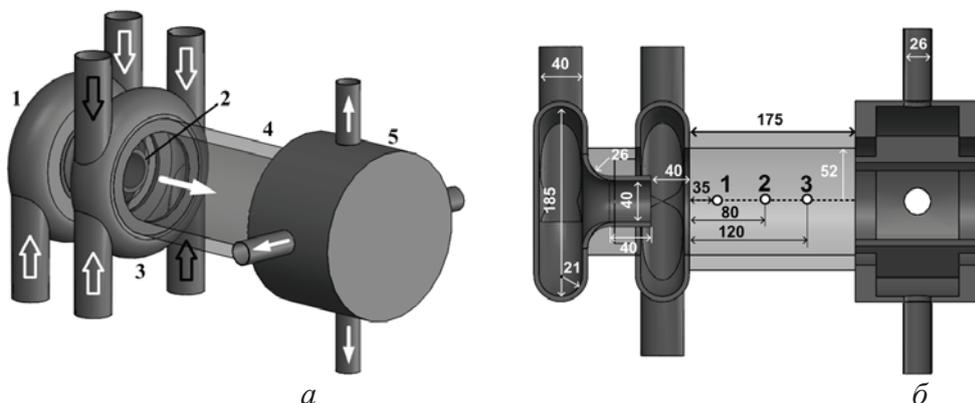


Рис. 2. Схема гидродинамической модели двухступенчатой горелки: а) 3-d вид: 1 – завихритель первой ступени горелочного устройства, 2 – профилированное сопло, 3 – завихритель второй ступени, 4 – область внезапного расширения, 5 – выходная секция с отводами и системой лопаток; б) продольный разрез: 1, 2, 3 – измерительные сечения при ЛДА-измерениях

Fig. 2. Diagram of a hydrodynamic model of a two-stage burner: а) 3-d view: 1 – swirler of the first stage of the burner, 2 – shaped nozzle, 3 – swirl of the second stage, 4 – sudden expansion area, 5 – outlet section with taps and blade system; б) longitudinal section: 1, 2, 3 – measuring sections for LDA measurements

искажений не удалось провести измерения скорости вблизи дальней стенки из-за ухудшения ЛДА сигнала по тангенциальной компоненте (процесс измерения останавливался, как только сигнал по одной из компонент скорости прерывался).

Результаты эксперимента

Визуализация течения

На рис. 3 показана визуализация течения в первой ступени модели горелочного устройства. Для обеспечения визуального обзора вторая ступень при этом не установлена. Сильная закрутка потока в тангенциальном завихрителе первой ступени приводит к эффекту распада закрученной струи на выходе из сопла за счет того, что поток проходит область внезапного расширения. Данный эффект характеризуется образованием центральной зоны возвратного течения. В изотермических условиях также наблюдается развитие сильной гидродинамической неустойчивости потока в виде прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ). ПВЯ хорошо выражено внутри сопла и в непосредственной близости от среза сопла, но быстро разрушается в области внезапного расширения и на расстоянии менее половины диаметра сопла уже практически неразличимо (рис. 3). При одноступенчатой конфигурации после дезинтеграции первичного прецессирующего вихря в области внезапного расширения происходит формирование вторичного прецессирующего вихря. В зависимости от длины цилиндрической камеры вторичный вихрь имеет одно- или двухспиральную геометрию [19].

Проведенные ранее опыты с одноступенчатой конфигурацией в условиях горения показали, что образующаяся центральная рециркуляционная

зона способствует надежной стабилизации факела в широком диапазоне режимов работы горелки. Также в условиях горения гидродинамическая неустойчивость хотя и присутствует, но оказывается значительно подавленной, что сказывается на существенном снижении уровня пульсаций потока [20]. Таким образом, выбор данной конфигурации для использования в качестве первой поджиговой ступени в двухступенчатом горелочном устройстве является вполне оправданным. Дальнейшие исследования должны определить оптимальные условия для эффективного смешения потока первой ступени с потоком, подаваемым во вторую ступень.

Далее представлены результаты исследований для режимов работы с включенной второй ступенью. Как первый этап исследований была проведена визуализация режимов течения с созакруткой и противокруткой для различных соотношений расходов жидкости между двумя ступенями рабочего участка. Примеры полученных результатов визуализации режимов с созакруткой и противокруткой потоков представлены на рис. 5 для цилиндрической области, где уже произошло слияние закрученных потоков от двух ступеней (рис. 4). Мгновенная структура течения показана в виде стоп-кадров скоростной видеозаписи, проведенной для двух характерных режимов: с большим расходом в первой ступени – $Q_1=6$ м³/ч, $Q_2=4$ м³/ч (рис. 5, а, в, д); наоборот, с большим расходом через вторую ступень – $Q_1=4$ м³/ч, $Q_2=6$ м³/ч (рис. 5, б, г, е).

В случаях с созакруткой потоков скоростная съемка (рис. 5, а–г) показывает наличие вторичной неустойчивости течения с образованием на границе центральной застойной области одинарного прецессирующего вихря, в результате чего ин-

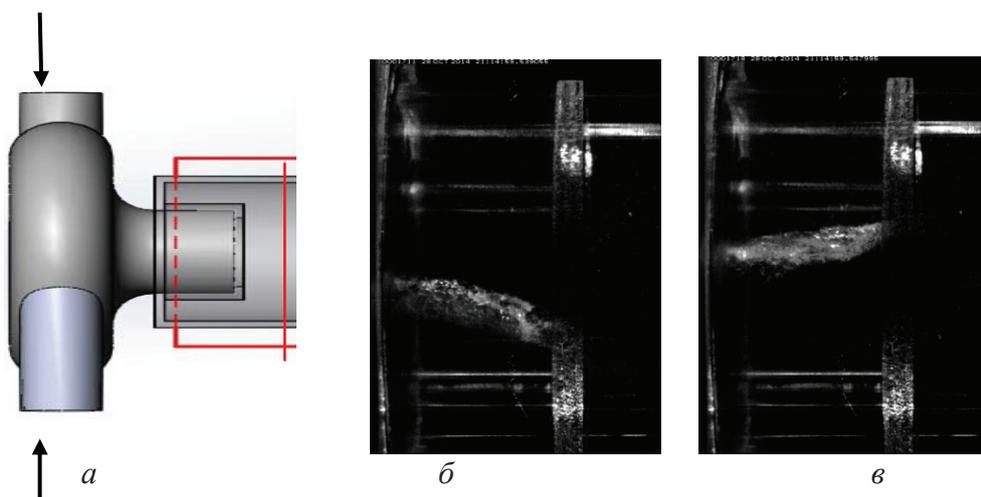


Рис. 3. Визуализация течения в первой ступени вихревой камеры. Направление потока: слева-направо. а) область визуализации (выделена прямоугольником); б, в) стоп-кадры скоростной визуализации в разные моменты времени. Воздух, подаваемый в жидкость для визуализации течения, сепарируется в центр вихревого ядра, образуя газовую полость, которая хорошо видна на кадрах

Fig. 3. Visualization of the flow in the first stage of the vortex chamber. Flow direction: from left to right. а) the visualization area (highlighted by a rectangle); б, в) snapshots of high-speed visualization at different times. The air supplied to the fluid for visualization of the flow is separated into the center of the vortex core, forming a gas cavity, which is clearly visible in the frames

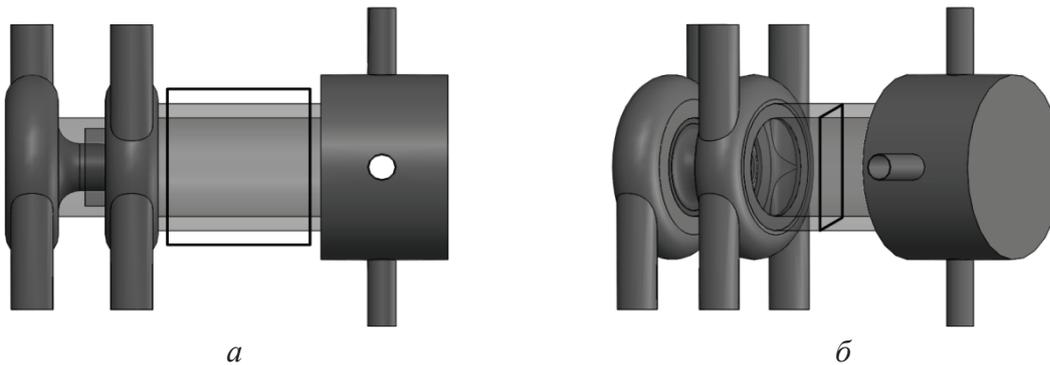


Рис. 4. Схема расположения областей визуализации: а) продольная плоскость, б) поперечное сечение

Fig. 4. Layout of the visualization areas: а) longitudinal plane, б) cross-section

дуцируются мощные низкочастотные пульсации потока с выделенной частотой. Картина течения для созакрутки в целом похожа как для показанных на рис. 5, а–г режимов, так и для других режимов, в частности, $Q_1=8 \text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_2=4 \text{ м}^3/\text{ч}$; $Q_1=6 \text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_2=6 \text{ м}^3/\text{ч}$; $Q_1=4 \text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_2=8 \text{ м}^3/\text{ч}$, которые были дополнительно исследованы. Главная особенность структуры потока, именно генерация вторичного прецессирующего вихревого ядра, имеет место для всех исследованных режимов. Визуализация течения в поперечном сечении для одного из этих режимов наглядно показывает классический вид смещенного относительно центра канала вихревого ядра, который вращается в направлении закрутки потока (рис. 6). Эффект отношения расходов через первую и вторую ступени, который можно отметить на основе визуализации, состоит в том, что при увеличении доли расхода через вторую ступень возрастает уровень закрутки потока и, соответственно, интенсивность вторичного прецессирующего вихря. При этом амплитуда прецессии возрастает, как это можно видеть сравнивая пары кадров видеозаписи на рис. 5: а, в и б, г.

Вариант с противозакруткой показал эффективное смещение закрученных потоков первой и второй ступеней, следствием чего является существенное гашение закрутки результирующего потока. При таком низком уровне закрутки потока не происходит формирование крупномасштабных нестационарных структур в виде ПВЯ и, соответственно, отсутствуют интенсивные регулярные пульсации течения. Также при противозакрутке не образуется центральная зона дефицита осевой скорости, т. е. результирующий поток характеризуется достаточно равномерным распределением осевой скорости вдоль поперечного сечения (рис. 5, д, е). Соотношением расходов в ступенях можно регулировать степень гашения закрутки. Так, при $Q_1=6 \text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_2=4 \text{ м}^3/\text{ч}$ реализуется практически прямоточный результирующий поток с нулевой закруткой (рис. 5, д). При увеличении доли расхода через вторую ступень ($Q_1=4 \text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_2=6 \text{ м}^3/\text{ч}$) поток, сформированный в ней, закручивает поток из первой ступени в обратную сторону и весь результи-

рующий поток приобретает умеренную противозакрутку (рис. 5, е).

ЛДА-измерения

Дальнейшие исследования проводились при расходе жидкости $4 \text{ м}^3/\text{ч}$ на первой и $6 \text{ м}^3/\text{ч}$ на второй ступенях закрутки потока, что соответствует режиму работы двухступенчатой горелки, когда основной расход топлива подается во вторую ступень, а первая ступень с меньшей загрузкой выполняет функцию поджига основного потока. Измерения с помощью ЛДА-техники должны дать количественные данные для сравнительного анализа режимов с созакруткой и противозакруткой потоков и подтвердить выводы, сделанные на основе качественных визуальных опытов.

Измерения осреднённой по времени осевой и тангенциальной компонент скорости были проведены вдоль трёх линий 1–3 в поперечном сечении цилиндрической области внезапного расширения (рис. 7). Характерные расстояния от выхода второй ступени закрутки потока до измеряемых сечений 1–3 приведены на рис. 2. На представленных графиках расстояние от центра вдоль оси x нормировано на радиус цилиндрической области внезапного расширения R_0 . В качестве масштаба скорости использована среднерасходная скорость \bar{V}_0 в цилиндрической области, определенная на основе суммарного расхода через две ступени завихрителей.

На рис. 8–10 представлены профили осевой и тангенциальной компонент скорости и их среднеквадратичные отклонения, измеренные в сечениях 1–3, соответственно. Распределения осевой скорости показывают, что в случаях с созакруткой потоков имеет место формирование неравномерного по поперечному сечению осевого течения с интенсивным протоком вдоль боковых стенок и обширной областью застойного течения вдоль оси камеры. Струя, вытекающая из сопла первой ступени завихрителя, частично заполняет центральный провал, вследствие чего профили осевой скорости вблизи оси имеют обратный выгиб. При режиме с противозакруткой потоков результирующая

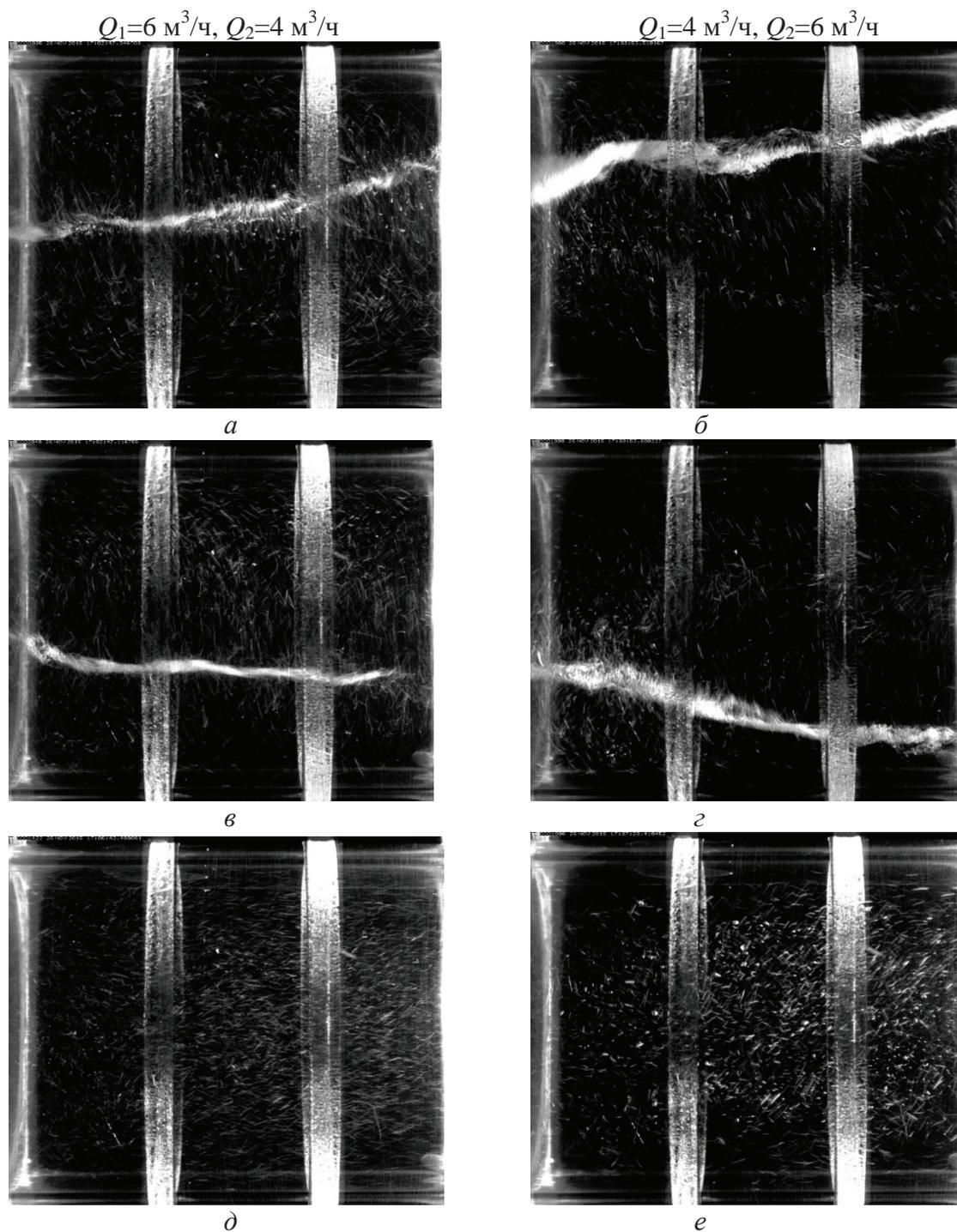


Рис. 5. Визуализация течения в продольной плоскости (рис. 4, а) для различных режимов работы вихревой камеры. Общее освещение светодиодной лампой. Направление потока: слева-направо. Режим с созакруткой потоков – а-г (а, в и б, г – пары кадров в разные моменты времени). Режим с противокруткой потоков – д, е. Слева кадры, соответствующие режиму $Q_1=6 \text{ м}^3/\text{ч}, Q_2=4 \text{ м}^3/\text{ч}$, справа – $Q_1=4 \text{ м}^3/\text{ч}, Q_2=6 \text{ м}^3/\text{ч}$

Fig. 5. Visualization of the flow in the longitudinal plane (Fig. 4, a) for various modes of operation of the vortex chamber. General lighting with LED lamp. Flow direction: from left to right. Mode with co-swirl flows – а-г (а, в and б, г – pairs of frames at different times). Mode with counter-swirl flows – д, е. To the left – frames corresponding to the mode $Q_1=6 \text{ м}^3/\text{ч}, Q_2=4 \text{ м}^3/\text{ч}$, right – $Q_1=4 \text{ м}^3/\text{ч}, Q_2=6 \text{ м}^3/\text{ч}$

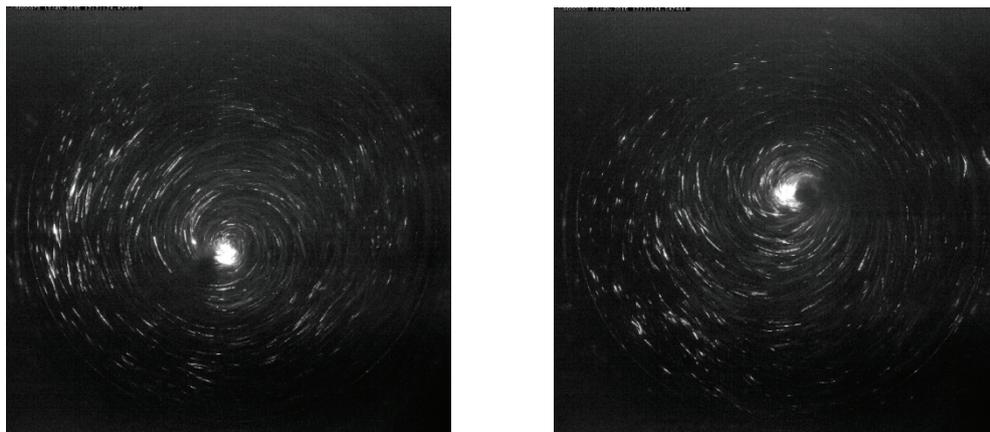


Рис. 6. Визуализация течения в поперечном сечении (рис. 4, б) в разные моменты времени. Освещение с помощью лазерного «ножа»

Fig. 6. Visualization of the flow in the cross section (Fig. 4, б) at different instants of time. Lighting with a laser knife. $Q_1=Q_2=6 \text{ m}^3/\text{h}$

структура течения характеризуется достаточно равномерным распределением осевой скорости вдоль поперечного сечения, за исключением сечения 3, где начинает сказываться влияние выхода из вихревой камеры.

В случае с созакруткой течение отличается высоким уровнем тангенциальной компоненты скорости, что приводит к эффекту распада вихря и генерации выраженного ПВЯ, которое проявляется в профилях RMS тангенциальной скорости в виде отчетливых центральных пиков. Именно эти центральные пики, основной вклад в которые дает когерентная составляющая пульсаций скорости, однозначно указывают на наличие прецессионного движения вихревого ядра [21, 22]. Вместе с тем пики в распределениях RMS осевой скорости соответствуют границе застойной области, видной на профилях средней осевой скорости.

В режиме с противокруткой поток второй ступени, как уже отмечалось выше, раскручивает результирующий поток в обратном направлении. За счет эффекта взаимного гашения закрутки уровень тангенциальных скоростей становится более низким. Причем закрутка больше локализована вблизи боковой стенки, а центральная область имеет очень слабый уровень закрутки, имея тенденцию смены знака вращения в ближнем сечении 1. Распределения среднеквадратичных отклонений обеих компонент скорости не имеют каких-либо особенностей, в том числе центральных пиков на профилях RMS тангенциальной скорости, которые могли бы указывать на наличие прецессии вихря.

Таким образом, результаты измерений показывают, что противокрутка потоков в первой и второй ступенях способствует формированию более оптимальной аэродинамической структуры течения, характеризующейся равномерным распределением осевой скорости по поперечному сечению в

сочетании с достаточно выраженным общим вращательным движением потока в рабочем участке. Также следует отметить, анализируя распределения пульсационных составляющих скоростей, отсутствие в случае противокрутки сильной нестационарности течения, в отличие от режимов с созакруткой, когда в результирующем потоке происходит образование интенсивного прецессирующего вихря, генерирующего повышенный уровень пульсаций потока. В дополнение к этому, режимы с созакруткой отличаются крайне неравномерным распределением осевой скорости в поперечном сечении вихревой камеры, когда основной проток имеет место вдоль узкой пристенной области, а большая часть проходного сечения камеры занята областью со слабым осевым потоком (застойная область).

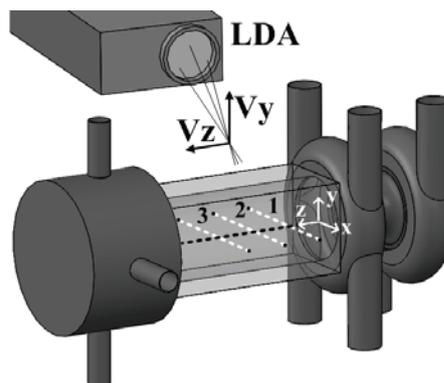


Рис. 7. Схема эксперимента при ЛДА измерениях и система координат (вид с тыльной стороны рабочего участка). V_z , V_y – измеряемые компоненты скорости. 1, 2, 3 – измерительные сечения (рис. 2)

Fig. 7. Scheme of the experiment for LDA measurements and coordinate system (view from the back of the working area). V_z , V_y are the measured components of the velocity. 1, 2, 3 – measuring sections (Fig. 2)

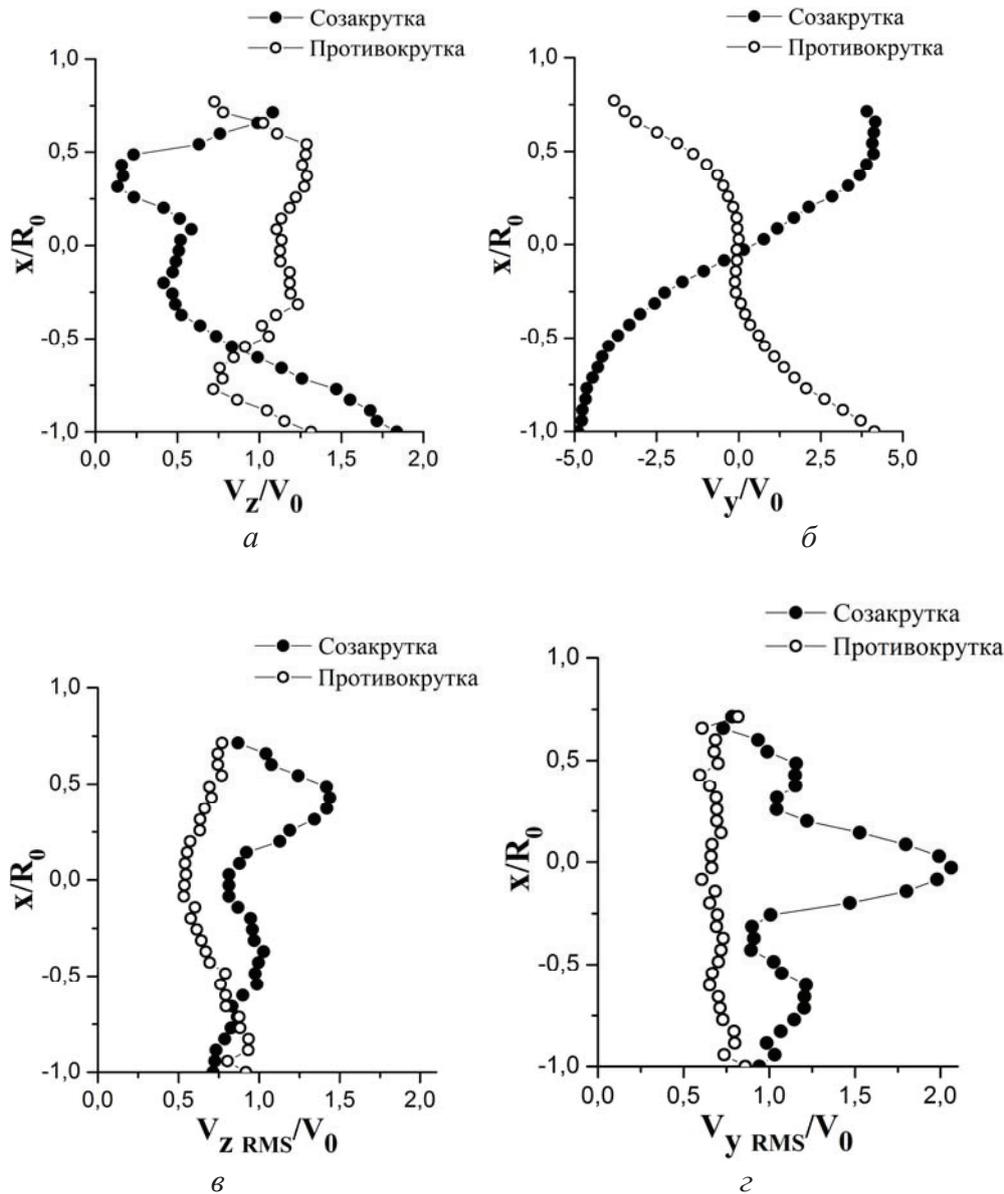


Рис. 8. Профили осреднённой осевой (а) и тангенциальной (б) компоненты скорости. Профили среднеквадратичного отклонения осевой (в) и тангенциальной (г) компоненты скорости. Сечение 1

Fig. 8. Profiles of the averaged axial (a) and tangential (б) velocity components. Profiles of root-mean-square deviation of the axial (в) and tangential (г) velocity components. Section 1

Заключение

В ходе работы была проведена высокоскоростная съёмка течения для разных вариантов закрутки потоков в гидродинамической модели двухступенчатого горелочного устройства. При режиме с потоками, закрученными в одном направлении, было выявлено образование вторичного прецессирующего вихря, генерирующего сильные низкочастотные пульсации потока. Режим с потоками, закрученными в разных направлениях, показал равномерное заполнение объема рабочего участка в сочетании с выраженной умеренной закруткой потока и устойчивостью течения. Результаты визуальных наблюдений были подтверждены количе-

ственными измерениями. Полученные при помощи двухкомпонентного ЛДА профили осредненных по времени осевой и тангенциальной компонент скорости продемонстрировали, что в случае созакрученных потоков наблюдается неравномерное распределение осевой скорости в поперечном сечении с ярко выраженным течением вдоль боковых стенок. В свою очередь характерные профили осевой компоненты скорости для случая с противозакрученными потоками показали равномерное распределение, отражающее эффективное смешение двух потоков.

Исходя из результатов проведенных изотермических опытов можно заключить, что вариант с

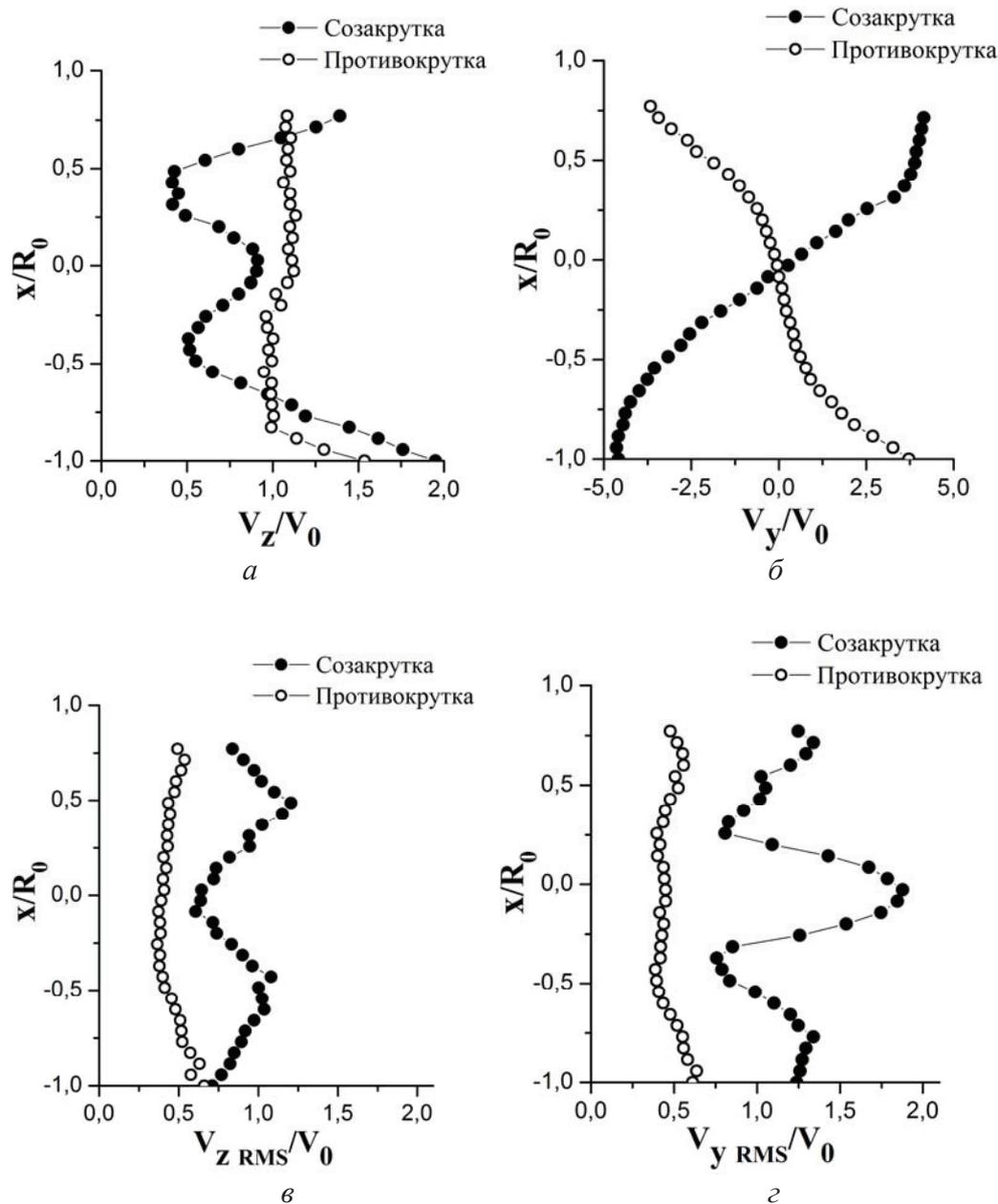


Рис. 9. Профили осреднённой осевой (а) и тангенциальной (б) компоненты скорости. Профили среднеквадратичного отклонения осевой (в) и тангенциальной (г) компоненты скорости. Сечение 2

Fig. 9. Profiles of the averaged axial (a) and tangential (б) velocity components. Profiles of root-mean-square deviation of the axial (в) and tangential (г) velocity components. Section 2

противокруткой является более предпочтительным для использования в двухступенчатой горелке в плане возможности более быстрого смешения горелочных струй первой и второй ступеней, а также более равномерного заполнения внутреннего объема устройства в сочетании с устойчивой выраженной закруткой потока, которая должна увеличивать время пребывания частиц топлива в зоне

активного горения и, соответственно, его более полного выгорания. Последний фактор достигается без развития сильной гидродинамической неустойчивости течения, характерной для аппаратов с сильной закруткой потока.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по Соглашению о субсидии № 14.607.21.0150.

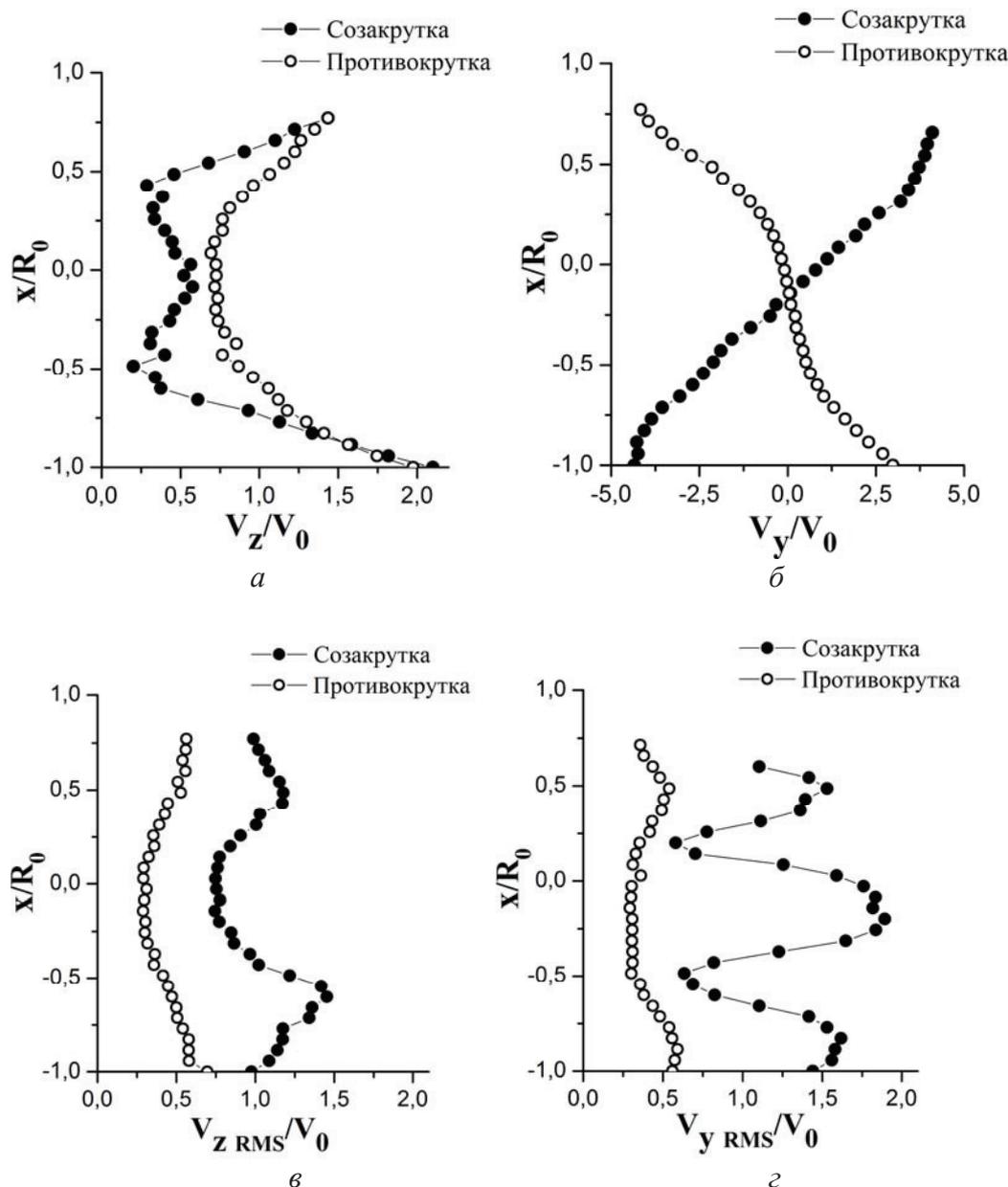


Рис. 10. Профили осреднённой осевой (а) и тангенциальной (б) компоненты скорости. Профили среднеквадратичного отклонения осевой (в) и тангенциальной (г) компоненты скорости. Сечение 3

Fig. 10. Profiles of the averaged axial (a) and tangential (б) velocity components. Profiles of root-mean-square deviation of the axial (в) and tangential (г) velocity components. Section 3

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волшаник В.В., Орехов Г.В. Области применения взаимодействия закрученных потоков жидкостей и газов // Вестник МГСУ. – 2015. – № 7. – С. 87–104.
2. Закрученные потоки в гидротехнических сооружениях / В.В. Волшаник, А.Л. Зуйков, А.П. Мордасов, Г.И. Кривченко. – СПб.: Энергоатомиздат, 1990. – 280 с.
3. Моделирование и расчет контрвихревых течений / В.К. Ахметов, В.В. Волшаник, А.Л. Зуйков, Г.В. Орехов / под ред. А.Л. Зуйкова. – М.: МГСУ, 2012. – 252 с.
4. Chao Y.C. Recirculation Structure of the Co-annular Swirling Jets in a Combustor // AIAA Journal. – 1988. – V. 26. – № 5. – P. 623–625.
5. Mehta J., Shin H., Wisler D. Mean Velocity and Turbulent Flow-Field Characteristics Inside an Advanced Combustor Swirl Cup // 27th Aerospace Sciences Meeting. – Nevada: January 1989. AIAA Paper 89-0215.
6. Effect of co- and counter-swirl on the isothermal flow- and mixture-field of an airblast atomizer nozzle / K. Merkle, H. Haessler, H. Buchner, N. Zarzalis // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2003. – V. 24. – P. 529–537.
7. Hadeif R., Lenze B. Effects of co- and counter-swirl on the droplet characteristics in a spray flame // Chemical Engineering and Processing. – 2008. – V. 47. – P. 2209–2217.
8. Gupta A.K., Lewis M.J., Daurer M. Swirl Effects on Combustion Characteristics of Premixed Flames // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2001. – V. 123. – P. 619–626.

9. Yonmo Sung, Gyungmin Choi. Non-intrusive optical diagnostics of co- and counter-swirling flames in a dual swirl pulverized coal combustion burner // *Fuel*. – 2016. – V. 174. – P. 76–88.
10. Исследование процессов воспламенения, горения и образования вредных веществ при сжигании твердого органического топлива на стенде с вихревой камерой / А.П. Бурдуков, М.Ю. Чернецкий, А.А. Дектерев, И.С. Ануфриев, П.А. Стрижак., П.Ю. Гребеньков // *Теплоэнергетика*. – 2016. – № 1. – С. 64–70.
11. Способ сжигания угля микропомола и угля обычного помола в пылеугольной горелке и устройство для его реализации: пат. Рос. Федерации № 2460941; заявл. 11.02.11; опубл. 10.09.12, Бюл. № 25. – 13 с.
12. Кутателадзе С.С., Ляховский Д.Н., Пермяков В.А. Моделирование теплоэнергетического оборудования. – М.: Энергия, 1966. – 350 с.
13. Исследование структуры течения в новой конструкции вихревой топке методом цифровой трассерной визуализации / И.С. Ануфриев, Г.В. Кузнецов, Е.Ю. Шадрин, О.В. Шарыпов, Ю.А. Аникин, С.В. Двойнишников, Д.В. Куликов, В.В. Рахманов // *Известия Томского политехнического университета*. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 31–35.
14. Аэродинамика перспективной конструкции вихревой топке / И.С. Ануфриев, П.А. Стрижак, М.Ю. Чернецкий, Е.Ю. Шадрин, О.В. Шарыпов // *Письма в Журнал технической физики*. – 2015. – Т. 41. – № 15. – С. 25–32.
15. Анализ аэродинамической структуры закрученного течения в моделях вихревых горелочных устройств / Е.С. Гешева, И.В. Литвинов, С.И. Шторк, С.В. Алексеев // *Теплоэнергетика*. – 2014. – № 9. – С. 33–41.
16. Моделирование топочных процессов при сжигании распыленного угля в вихревой топке усовершенствованной конструкции. Ч. 1. Аэродинамика течения в вихревой топке / Д.В. Красинский, В.В. Саломатов, И.С. Ануфриев, О.В. Шарыпов, Е.Ю. Шадрин, Ю.А. Аникин // *Теплоэнергетика*. – 2015. – № 2. – С. 41–46.
17. Yanta W.J., Smith R.A. Measurements of turbulent transport properties with a laser Doppler velocimeter // 11th Aerospace Science Meeting. – Washington, 1978. AIAA Paper 73–169.
18. Zhang Zh. Optical guidelines and signal quality for LDA applications in circular pipes // *Exp. Fluids*. – 2004. – V. 37. – P. 29–39.
19. Юсупов Р.Р., Шторк С.И., Алексеев С.В. Исследование сильнозакрученного газожидкостного потока в гидродинамической вихревой камере // *Вестник НГУ. Серия: Физика*. – 2016. – Т. 11. – № 1. – С. 45–55.
20. Литвинов И.В., Назаров А.Д., Шторк С.И. Подавление прецессии вихревого ядра в закрученном реагирующем потоке // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2016. – Т. 23. – № 2. – С. 315–318.
21. Heitor M.V., Whitelaw J.H. Velocity, temperature, and species characteristics of the flow in a gas-turbine combustor // *Combust Flame*. – 1986. – V. 64. – P. 1–32.
22. Fernandes E.C., Heitor M.V., Shtork S.I. An analysis of unsteady highly turbulent swirling flow in a model vortex combustor // *Experiments in Fluids*. – 2006. – V. 40. – P. 177–187.

Поступила 14.05.2017 г.

Информация об авторах

Алексеев С.В., доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, заведующий кафедрой физики неравновесных процессов Новосибирского государственного университета; директор Института теплофизики СО РАН.

Шторк С.И., доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования энергетических процессов научно-исследовательской части Новосибирского государственного университета; заведующий лабораторией 7.1 экологических проблем теплоэнергетики Института теплофизики СО РАН.

Юсупов Р.Р., лаборант Института теплофизики СО РАН; магистрант Новосибирского государственного университета.

UDC 532.5

ISOTHERMAL MODELING OF SWIRLING FLOW AERODYNAMIC STRUCTURE IN A TWO-STAGE BURNER

Sergey V. Alekseenko^{1,2},
aleks@itp.nsc.ru

Sergey I. Shtork^{1,2},
shtork@itp.nsc.ru

Roman R. Yusupov^{1,2},
romansensk@yandex.ru

¹ Novosibirsk State University,
1, Pirogova street, Novosibirsk, 630090, Russia.

² Institute of Thermophysics SB RAS,
1, Acad. Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The work motivation is determined by the extensive use of interacting swirling flows in counter vortex quenchers and vortex combustion chambers. To optimize the design of such devices, it is necessary to understand the structure of the flow and the mechanisms of interaction of co-axial swirling flows. With regard to burner devices, these studies are important for the most efficient combustion of fuel, reducing the polluting emissions of combustion products and increasing the durability of combustion chambers.

The main aim of the study is the experimental investigation of aerodynamic structure of the swirling flow in isothermal model of two-stage vortex burner device. The main attention is paid to the mixing process of swirling streams formed in two consecutively connected tangential swirlers representing first and second stages of the burner device.

The methods used in the study. Flow visualization for various swirl flow configurations were obtained using a digital high-speed camera. Profiles of the time-averaged axial and tangential velocity components as well as their pulsating parts (root mean square deviation) were obtained using a laser-Doppler anemometer.

The results. The formation of a secondary instability of the flow in the form of a precessing vortex was revealed in the case of regime with co-swirl of flows between two stages of the working section. Effective mixing of swirl flows was detected in the counter-swirl mode. Based on the results of conducted isothermal experiments it can be concluded that the counter-swirl mode is more preferable for application in a two-stage burner in terms of the possibility of faster mixing of the burner flows of the first and second stages. The resulting flow is characterized by a more uniform flow distribution inside the device in combination with a stable flow swirling, which should increase the residence time of the fuel particles in the active combustion zone and, accordingly, ensures their complete burn-out. The latter factor is achieved without the development of a strong hydrodynamic instability of the flow, which is characteristic of apparatus with a strong flow swirling.

Key words:

Vortex burners, coaxial swirling flows, high-speed visualization, laser-Doppler anemometer, precessing vortex core.

The research was financially supported by the Ministry of Education and Science of the RF by the grant agreement on no. 14.607.21.0150.

REFERENCES

- Volshanik V.V., Orekhov G.V. Areas of use of interacting swirl liquid and gas flows. *Vestnik MGSU*, 2015, no. 7, pp. 87–104. In Rus.
- Volshanik V.V., Zuikov A.L., Mordasov A.P., Krivchenko G.I. *Zakruchennyye potoki v gidrotekhnicheskikh sooruzheniyakh* [Swirl Flows in Hydraulic Structures]. Saint Petersburg, Energoatomizdat Publ., 1990. 280 p.
- Akhmetov B.K., Volshanik V.V., Zuikov A.L., Orekhov G.V. *Modelirovaniye i raschet kontrvikhrevykh techenii* [Modeling and Calculation of Counter Vortex Currents]. Moscow, MGSU Press, 2012. 252 p.
- Chao Y.C. Recirculation Structure of the Co-annular Swirling Jets in a Combustor. *AIAA Journal*, 1988, vol. 26, no. 5, pp. 623–625.
- Mehta J., Shin H., Wisler D. Mean Velocity and Turbulent Flow-Field Characteristics Inside an Advanced Combustor Swirl Cup. *27th Aerospace Sciences Meeting*. Nevada, January 1989. AIAA Paper 89–0215.
- Merkle K., Haessler H., Buchner H., Zarzalis N. Effect of co- and counter-swirl on the isothermal flow- and mixture-field of an air-blast atomizer nozzle. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2003, vol. 24, pp. 529–537.
- Hadef R., Lenze B. Effects of co- and counter-swirl on the droplet characteristics in a spray flame. *Chemical Engineering and Processing*, 2008, vol. 47, pp. 2209–2217.
- Gupta A.K., Lewis M.J., Daurer M. Swirl Effects on Combustion Characteristics of Premixed Flames. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2001, vol. 123, pp. 619–626.
- Yonmo Sung, Gyungmin Choi. Non-intrusive optical diagnostics of co- and counter-swirling flames in a dual swirl pulverized coal combustion burner. *Fuel*, 2016, vol. 174, pp. 76–88.
- Burdukov A.P., Chernetsky M.Yu., Dektarev A.A., Anufriev I.S., Strizhak P.A., Grebenkov P.Yu. Study of ignition, combustion, and production of harmful substances upon burning solid organic fuel at a test bench with a vortex chamber. *Thermal Engineering*, 2016, vol. 63, no. 1, pp. 61–67. In Rus.
- Alekseenko S.V., Burdukov A.P., Popov V.I., Popov Yu.S., Shtork S.I. *Sposob szhiganiya uglya mikropomola i uglya obychnogo pomola v pyleugolnoy gorelke i ustroystvo dlya ego realizatsii* [Method of burning micronized coal and regularly milled coal in

- pulverized coal burner and design for the method realization]. Patent RF, no. 2460941, 2012.
12. Kutateladze S.S., Lyakhovskii D.N., Permyakov V.A. *Modelirovanie teploenergeticheskogo oborudovaniya* [Modeling thermal power equipment]. Moscow, Energiya Publ., 1966. 350 p.
 13. Anufriev I.S., Kuznetsov G.V., Shadrin E.Yu., Sharypov O.V., Anikin Yu.A., Dvoynishnikov S.V., Kulikov D.V., Rakhmanov V.V. Study of flow structure in a new construction of vortex furnace by the particle image velocimetry. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 4, pp. 31–35. In Rus.
 14. Anufriev I.S., Strizhak P.A., Chernetskii M.Yu., Shadrin E.Yu., Sharypov O.V. Aerodinamika perspektivnoi konstruktsii vikhrevoi topki [Aerodynamics of a promising vortex furnace design]. *Technical Physics Letters*, 2015, vol. 41, no. 8, pp. 727–730.
 15. Gesheva E.S., Litvinov I.V., Shtork S.I., Alekseenko C.V. Analyzing the aerodynamic structure of swirl flow in vortex burner models. *Thermal Engineering*, 2014, vol. 61, no. 9, pp. 649–657. In Rus.
 16. Krasinskii D.V., Salomatov V.V., Anufriev I.S., Sharypov O.V., Shadrin E.Yu., Anikin Yu.A. Modeling of pulverized coal combustion processes in a vortex furnace of improved design. P. 1: Flow aerodynamics in a vortex furnace. *Thermal Engineering*, 2015, vol. 62, no. 2, pp. 117–122. In Rus.
 17. Yanta W.J., Smith R.A. Measurements of turbulent transport properties with a laser Doppler velocimeter. *11th Aerospace Science Meeting. AIAA Paper*. Washington, 1978. AIAA Paper 73–169.
 18. Zhang Zh. Optical guidelines and signal quality for LDA applications in circular pipes. *Exp. Fluids*, 2004, vol. 37, pp. 29–39.
 19. Yusupov R.R., Shtork S.I., Alekseenko S.V. Study of strongly swirling gas-liquid flows in a hydrodynamic vortex chamber. *Vestnik NGU, Seriya: Fizika*, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 45–55. In Rus.
 20. Litvinov I.V., Nazarov A.D., Shtork S.I. Suppression of vortex core precession in a swirling reacting flow. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2016, vol. 23, no. 2, pp. 305–308. In Rus.
 21. Heitor M.V., Whitelaw J.H. Velocity, temperature, and species characteristics of the flow in a gas-turbine combustor. *Combust Flame*, 1986, vol. 64, pp. 1–32.
 22. Fernandes E.C., Heitor M.V., Shtork S.I. An analysis of unsteady highly turbulent swirling flow in a model vortex combustor. *Experiments in Fluids*, 2006, vol. 40, pp. 177–187.

Received: 14 May 2017.

Information about the authors

Sergey V. Alekseenko, Dr. Sc., professor, academician RAS, head of the department, Novosibirsk State University; director, Institute of Thermophysics SB RAS.

Sergey I. Shtork, Dr. Sc., leading researcher, Novosibirsk State University; head of the laboratory, Institute of Thermophysics SB RAS.

Roman R. Yusupov, laboratory assistant, Novosibirsk State University; master, Institute of Thermophysics SB RAS.

УДК 553.98(571)

ТЕКТОНО-СЕДИМЕНТАЦИОННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ГЕОТЕРМИИ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ И ОЦЕНКЕ ПОЗДНЕЭОЦЕНОВОЙ ЭРОЗИИ НА АРКТИЧЕСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УГЛЕВОДОРОДОВ (П-ВА ЯМАЛ)

Исаев Валерий Иванович¹,

isaewi@tpu.ru

Старостенко Виталий Иванович²,

vstar@igph.kiev.ua

Лобова Галина Анатольевна¹,

lobovaga@tpu.ru

Фомин Александр Николаевич³,

fominan@ipgg.sbras.ru

Исагалиева Айгуль Калиевна⁴,

a_isagalieva@mail.ru

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

² Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины,
03142, Украина, г. Киев, пр. Палладина, д. 32.

³ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, д. 3.

⁴ Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, д. 22

Актуальность. Разработана схема и критерии применения измеренных и моделируемых геотемператур для изучения тектоно-седиментационной истории осадочных бассейнов арктического региона Западной Сибири – приоритетного объекта новой стратегии развития сырьевой базы углеводородов РФ.

Цель исследования: выработать и апробировать методику оценки позднеэоценовой эрозии арктических районов Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции на основе моделирования геотермического режима баженовских нефтематеринских отложений, на примере Арктического, Средне-Ямальского и Ростовцевского месторождений.

Объект исследования: тектоно-седиментационная история кайнозойско-мезозойского разреза, палеотермический режим баженовских отложений, вскрытых глубокими скважинами на Арктической, Средне-Ямальской и Ростовцевской площадях (п-в Ямал).

Специальная методика исследования основывается на: 1) палеотемпературном моделировании, учитывающем параметры тектоно-седиментационной истории, измеренные пластовые температуры и палеотемпературы, определенные по отражательной способности витринита; 2) многовариантности палеотектонических и палеотемпературных реконструкций и на анализе варируемости результатов; 3) оценке соответствия результатов критериям оптимальности решения обратной задачи геофизики; 4) согласованности расчетных значений плотности теплового потока с экспериментальными данными; 5) согласованности расчетных очагов генерации УВ с установленной геологоразведкой нефтегазоносностью недр.

Результаты исследования. Реализованная вариативность сценариев тектоно-седиментационной истории и реконструкций геотермического режима баженовской свиты выявила и дала количественную оценку перерывам в осадконакоплении и денудаций в позднеэоценовое время на месторождениях углеводородов п-ва Ямал. Установлено, что привлечение данных отражательной способности витринита дает свидетельства существования денудаций и определяет возможность оценки масштабов денудаций. Сценарий истории геологического развития, учитывающий эрозионные процессы, дает наиболее «богатую» термическую историю материнских отложений, обеспечивает наибольшую расчетную плотность ресурсов генерированных нефтей. Применение разработанной схемы и критериев выявления перерывов осадконакопления и денудации методом геотермии, в комплексе с геологическими методами и сейсморазведкой, существенно повышает достоверность знаний об истории геологического развития регионов Западной Сибири.

Ключевые слова:

Тектоно-седиментационная история, геотермический режим, баженовские отложения, отражательная способность витринита, месторождения углеводородов п-ва Ямал.

Введение

В рамках стратегии развития сырьевой базы углеводородов (УВ) Западной Сибири главными объектами изучения и поисков становятся арктические районы и сланцевые ресурсы баженовской свиты [1, 2].

Как известно, оценка перспектив нефтегазоносности выполняется объемно-генетическим методом (бассейновое моделирование). Количество генерированных УВ рассчитывается на основе реконструкции геотемпературного режима нефтематеринских отложений.

теринских отложений и геохимических параметров керогена [3–8].

Вместе с тем в истории геологического развития северных районов Западной Сибири в кайнозойское время отмечаются геодинамические процессы, которые влияют как на формирование ловушек, так и на процессы нефтегазообразования [9]. А для адекватного бассейнового моделирования нужны сведения об амплитуде восходящих движений, эрозий и продолжительности перерывов в осадконакоплении [10, 11].

Дискуссия о перерывах в осадконакоплении, эрозиях на рубеже позднего палеогена и эоцена в арктической зоне Западной Сибири ведется не один десяток лет и продолжается по сей день [12–15]. Наличие перерывов в осадконакоплении и размывов установлено однозначно, однако их объем и временные привязки пока не определены. Поэтому определение объемов эродированных пород и геологического времени проявления этого процесса для арктических районов Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции (ЗСНГП) остается актуальной задачей в контексте бассейнового моделирования, а также задачей фундаментальной геологии Западной Сибири.

Возможность выявления перерывов осадконакопления и денудации методом геотермии, как методом, иным по физическим основам, наряду с геологическими методами и сейсморазведкой [16, 17], может существенно повысить достоверность знаний об истории геологического развития арктического региона Западной Сибири. Такая возможность особенно актуальна для северных районов ЗСНГП, где по некоторым оценкам размывы толщ палеоген-неогеновых пород достигают 700–1100 м [15].

Наиболее значимым применением геотермии как разведочного (поискового) метода геофизики является палеотемпературное моделирование термических условий в геологическом разрезе для прогноза и поисков залежей нефти и газа. Разработка схем и критериев применения геотермии как поискового метода находит отражение в исследованиях О.В. Веселова [18], Ю.И. Галушкина [19], И.В. Головановой [20], П.Ю. Горнова [21], Д.Ю. Демежко [22], А.Д. Дучкова [23], В.И. Ермакова [24], В.И. Зуя [25], В.И. Исаева [26], А.Э. Конторовича [27], Р.И. Кутаса [28–30], Г.А. Лобовой [31], Н.В. Лопатина [32], В.И. Старостенко [33], А.Н. Фомина [34] и других ученых. Значимый вклад в формирование геотермии как поискового метода для арктических регионов виден в работах А.Р. Курчикова [35–37] и М.Д. Хуторского [38–40].

Цель настоящей статьи – продемонстрировать оценку позднеэоценовой эрозии арктического региона Западной Сибири, выполненную на основе моделирования геотермического режима баженовских нефтематеринских отложений, на примере Арктического, Средне-Ямальского и Ростовцевского месторождений п-ва Ямал.

Характеристика объекта исследований

Моделирование палеогеотемпературных условий баженовских отложений выполнено для палеоседиментационных и геолого-геофизических условий арктических земель Западной Сибири в скважинах, расположенных на разных широтах п-ва Ямал (рисунок).

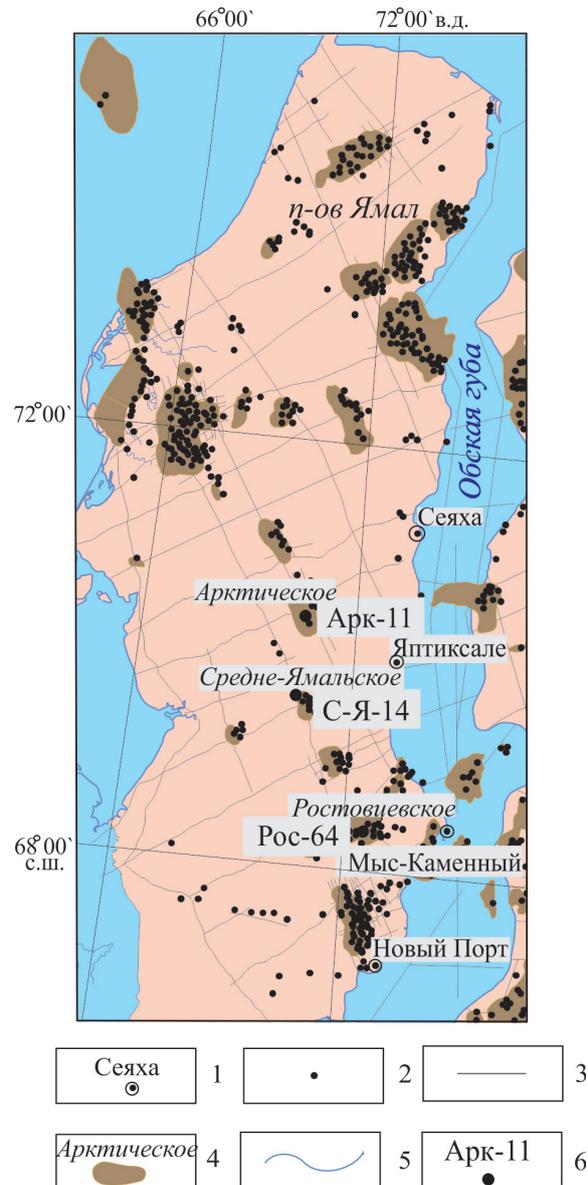


Рисунок. Обзорная схема территории исследований: 1 – населенный пункт и его название; 2 – поисково-разведочная скважина; 3 – сейсмический профиль МОГТ 2D; 4 – контур месторождения и его название (объекты исследований); 5 – гидрография и береговая линия; 6 – моделируемая скважина и ее условный индекс: Арк-11 – Арктическая 11, С-Я-14 – Средне-Ямальская 14, Рос-64 – Ростовцевская 64

Figure. Review scheme of the studied area: 1 – the locality and its name; 2 – the exploration well; 3 – the seismic profile CDPM 2D; 4 – the contour of the field and its name (survey target); 5 – the hydrography and coastline; 6 – the well simulated and its conditional index: Ark-11 – Arkticheskaya 11, C-Y-14 – Sredne-Yamalskaya 14, Ros-64 – Rostovtsevskaya 64

Осадочный мезозойско-кайнозойский чехол территории исследования начинает формироваться в ранней юре. К концу волжского века трансгрессия моря расширилась, идет накопление баженовской свиты (J_3+K_1bg), обогащенной органическим веществом.

Нефтематеринская баженовская свита является основным источником формирования залежей УВ в ловушках верхнеюрского и мелового нефтегазоносных комплексов, а также приоритетной сланцевой формацией. По среднему значению отражательной способности витринита – $R_{от}^0=0,96\%$ – в пределах Арктической площади баженовская свита находится в конце главной зоны нефтеобразования (база данных ИНГГ СО РАН, 2016).

Начиная с апт-сеномана морской режим господствует до начала эоцена. Раскрытие котловины Арктического бассейна приводит к смене знака вертикальных тектонических движений, и наступает позднеэоценовая регрессия. Анализ мощностей палеоген-неогена [41–43] показывает, что кровля люлинвора (ирбита) могла быть подвергнута денудации. При этом размывтый слой мог составлять порядка 500–700 м.

Посвитная разбивка от подошвы осадочного чехла до верхнего мела, включая березовскую свиту, принимается нами по данным ИНГГ СО РАН (литолого-стратиграфические разбивки, 2015 г.). Расчленение ниже-среднепалеогеновых свит, от ганькинской до ирбитской, заимствовано из мате-

Таблица 1. Описание сценариев седиментационной истории (скважина Арктическая 11)

Table 1. Description of scenarios of sedimentation history (Arkticheskaya well 11)

Свита, толща (стратиграфия) Suite, strata (stratigraphy)	Возраст, млн лет назад Age, million years ago	Время, млн лет Time, million years	Мощность (сценарий 1), м Thickness (Script 1), m	Мощность (сценарий 2), м Thickness (Script 2), m
Квартер+плиоцен Q-N ₂ /Quarter+Pliocene	0–4,1	4,1	280	280
N ₁₋₂	4,1–5,4	1,3	–113	–
Новопортовская N ₁₋₂ nvp/Novoportovskaya	5,4–8,4	3	50	–
Таволжанская N ₁ tv/Tavolzhanskaya	8,4–12,5	4,1	25	–
Бищеульская N ₁ bsch/Bishcheulskaya	12,5–14,5	2	38	–
N ₁	14,5–18,5	4	–535	–
Абросимовская N ₁ abr/Abrosimovskaya	18,5–23,0	4,5	25	–
Туртасская P ₃ tur/Turtasskaya	23,0–28,0	5	90	–
Новомихайловская P ₃ nvm/Novomikhaylovskaya	28,0–30,0	2	70	–
Атлымская P ₃ atl/Atlymskaya	30,0–34,0	4	100	–
Тавдинская P ₃ tv/Tavdinskaya	34,0–42,6	8,6	150	–
Нюрольская P ₂ nl/Nyurolskaya	42,6–50,4	7,8	100	–
Ирбитская (люлинворская) P ₂ ir/Irbitskaya (lyulinvorskaya)	50,4–55,0	4,6	20	20
Серовская P ₂ sr/Serovskaya	55,0–58,0	3	43	43
Тибейсалинская P ₂ tb/Tibeysalinskaya	58,0–63,7	5,7	120	120
Ганькинская K ₂ +P ₂ gn/Gankinskaya	63,7–73,0	9,3	40	40
Березовская K ₂ b/Berezovskaya	73,0–89,0	16	136	136
Кузнецовская K ₂ kz/Kuznetsovskaya	89,0–92,0	3	31	31
Марресалинская K ₁ –K ₂ mr/Marresalinskaya	92,0–102,0	10	550	550
Яронгская K ₁ jar/Yarongskaya	102–108,5	6,5	690	690
Танопчинская K ₁ tn/Tanopchinskaya	108,5–133,2	24,7	353	353
Ахская K ₁ ah/Akhsakaya	133,2–142,7	9,5	529	529
Баженовская J ₃ +K ₁ bg/Bazhenovskaya	142,7–149,3	6,6	16	16
Нурминская J ₂ nr/Nurminskaya	149,3–161,7	12,4	65	65
Мальшевская J ₂ ml/Malyshevskaya	161,7–171,0	9,3	95	95
Леонтьевская J ₂ ln/Leontyevskaya	171,0–173,0	2	130	130
Вымская J ₂ vm/Vymskaya	173,0–175,0	2	127	127
Лайдинская J ₂ ld/Laydinskaya	175,0–177,0	2	75	75
Надояхская J ₁ +J ₂ nd/Nadoyakhskaya	177,0–182,5	5,5	95	95
Китербютская (тогурская) J ₁ kt/Kiterbyutskaya (togurskaya)	182,5–184,0	1,5	39	39
Шараповская J ₁ shr/Sharapovskaya	184,0–186,0	2	50	50
Левинская J ₁ lv/Levinskaya	186,0–186,70	0,7	140	140
Мощность разреза, м/Section power, m			3624	3624

Таблица 2. Описание сценариев седиментационной истории (скважина Средне-Ямальская 14)

Table 2. Description of scenarios of sedimentation history (Sredne-Yamalskaya well 14)

Свита, толща (стратиграфия) Suite, strata (stratigraphy)	Возраст, млн лет назад Age, million years ago	Время, млн лет Time, million ye- ars	Мощность (сце- нарий 1), м Thick- ness (Script 1), m	Мощность (сценарий 2), м Thickness (Script 2), m
Квартер+плиоцен Q-N ₂ /Quarter+Pliocene	0–4,1	4,1	200	200
N ₁₋₂	4,1–5,4	1,3	–113	–
Новопортовская N ₁₋₂ nvp/Novoportovskaya	5,4–8,4	3	50	–
Таволжанская N ₁ tv/Tavolzhanskaya	8,4–12,5	4,1	25	–
Бищеульская N ₁ bsch/Bishcheulskaya	12,5–14,5	2	38	–
N ₁	14,5–18,5	4	–435	–
Абросимовская N ₁ abr/Abrosimovskaya	18,5–23,0	4,5	15	–
Туртасская P ₃ tur/Turtasskaya	23,0–28,0	5	70	–
Новомихайловская P ₃ nvm/Novomikhaylovskaya	28,0–30,0	2	50	–
Атлымская P ₃ atl/Atlymskaya	30,0–34,0	4	80	–
Тавдинская P ₂ tv/Tavdinskaya	34,0–42,6	8,6	130	–
Нюрольская P ₂ nl/Nyurolskaya	42,6–50,4	7,8	90	–
Ирбитская (люлинворская)-P ₂ ir/Irbitskaya (lyulinvorskaya)	50,4–55,0	4,6	120	120
Серовская P ₂ sr/Serovskaya	55,0–58,0	3	60	60
Тибейсалинская P ₂ tb/Tibeysalinskaya	58,0–63,7	5,7	50	50
Ганькинская K ₂ +P ₁ gn/Gankinskaya	63,7–73,0	9,3	120	120
Березовская K ₂ b/Berezovskaya	73,0–89,0	16	249	249
Кузнецовская K ₂ kz/Kuznetsovskaya	89,0–92,0	3	44	44
Марресалинская K ₁ -K ₂ mr/Marresalinskaya	92,0–102,0	10	485	485
Яронгская K ₁ jar/Yarongskaya	102–108,5	6,5	179	179
Танопчинская K ₁ tn/Tanopchinskaya	108,5–133,2	24,7	701	701
Ахская K ₁ ah/Akhskaya	133,2–142,7	9,5	647	647
Баженовская J ₃ +K ₁ bg/Bazhenovskaya	142,7–149,3	6,6	35	35
Нурминская J ₂ nr/Nurminskaya	149,3–161,7	12,4	16	16
Мальшевская J ₂ ml/Malyshevskaya	161,7–171,0	9,3	91	91
Леонтьевская J ₂ ln/Leontyevskaya	171,0–173,0	2	98	98
Вымская J ₂ vm/Vymskaya	173,0–175,0	2	124	124
Лайдинская J ₂ ld/Laydinskaya	175,0–177,0	2	71	71
Надояхская J ₁ +J ₂ nd/Nadoyakhskaya	177,0–180,0	3	93	93
Мощность разреза, м/Section power, m			3383	3383

риалов ВСЕГЕИ [43]. Вышележащие толщи расчленены на основе работ [41] и [42].

При построении седиментационно-теплофизической модели для моделируемых скважин (табл. 1–3) использованы стратиграфические разбивки, выполненные с учетом возможной динамики (сценариев) тектонических событий на протяжении формирования осадочного разреза на территории Ямала.

Оценка позднеэоценовой эрозии выполняется на основе анализа результатов палеотемпературных реконструкций 2-х основных сценариев: 1-й сценарий – учет накопления нюрольской, тавдинской, атлымской, новомихайловской, туртасской и абросимовской свит, а затем – основная позднеэоценовая регрессия; учет накопления бищеуль-

ских отложений, таволжанской и новопортовской свит, а затем их размыв. 2-й сценарий – учет пере-рывов в осадконакоплении, без эрозионных процессов. В этих сценариях учитывается «арктический» вековой ход температур на поверхности Земли [44].

О методике интерпретации

Применен метод палеотемпературного моделирования, основанный на численном решении уравнения теплопроводности горизонтально-слоистого твердого тела с подвижной верхней границей [45].

В математическую модель непосредственно включены климатический вековой ход температур на земной поверхности, как краевое условие, и палеотемпературы из определений отражательной

Таблица 3. Описание сценариев седиментационной истории (скважина Ростовцевская 64)

Table 3. Description of scenarios of sedimentation history (Rostovtsevskaya well 64)

Свита, толща (стратиграфия) Suite, strata (stratigraphy)	Возраст, млн лет назад Age, million years ago	Время, млн лет Time, million years	Мощность (сценарий 1), м (Script 1), m	Мощность (сценарий 2), м (Script 2), m
Квартер+плиоцен Q-N ₂ /Quarter+Pliocene	0–4,1	4,1	266	266
N ₁₋₂	4,1–5,4	1,3	-113	–
Новопортовская N ₁₋₂ nvp/Novoportovskaya	5,4–8,4	3	50	–
Таволжанская N ₁ tv/Tavolzhanskaya	8,4–12,5	4,1	25	–
Бищеульская N ₁ bsch/Bishcheulskaya	12,5–14,5	2	38	–
N ₁	14,5–18,5	4	-335	–
Абросимовская N ₁ abr/Abrosimovskaya	18,5–23,0	4,5	20	–
Туртасская P ₃ tur/Turtasskaya	23,0–28,0	5	50	–
Новомихайловская P ₃ nvm/Novomikhaylovskaya	28,0–30,0	2	35	–
Атлымская P ₃ atl /Atlymskaya	30,0–34,0	4	65	–
Тавдинская P ₂ tv/Tavdinskaya	34,0–42,6	8,6	110	–
Нюрольская P ₂ nl/Nyurolskaya	42,6–50,4	7,8	55	–
Ирбитская (люлинворская) P ₂ ir/Irbitskaya (lyulinvorskaya)	50,4–55,0	4,6	180	180
Серовская P ₁ sr/Serovskaya	55,0–58,0	3	100	100
Тибейсалинская P ₁ tb/Tibeysalinskaya	58,0–63,7	5,7	40	40
Ганькинская K ₂ +P ₁ gn/Gankinskaya	63,7–73,0	9,3	80	80
Березовская K ₂ b/Berezovskaya	73,0–89,0	16	338	338
Кузнецовская K ₂ kz/Kuznetsovskaya	89,0–92,0	3	18	18
Марресалинская K ₁ -K ₂ mr/Marresalinskaya	92,0–102,0	10	466	466
Яронгская K ₁ jar/Yarongskaya	102–108,5	6,5	206	206
Танопчинская K ₁ tn/Tanopchinskaya	108,5–133,2	24,7	718	718
Ахская K ₁ ah/Akhskaya	133,2–142,7	9,5	750	750
Баженовская J ₃ +K ₁ bg/Bazhenovskaya	142,7–149,3	6,6	33	33
Нурминская J ₂ nr/Nurminskaya	149,3–161,7	12,4	72	72
Мальшевская J ₂ ml/Malyshevskaya	161,7–171,0	9,3	105	105
Леонтьевская J ₁ ln/Leontyevskaya	171,0–172,0	1	113	113
Мощность разреза, м Section power, m			3485	3485

способности витринита (ОСВ), как «наблюдаемые». В модели палеотектонические реконструкции непосредственно сопряжены с палеотемпературными реконструкциями. В описании осадочной толщи скорости осадконакопления могут быть нулевыми и отрицательными, что позволяет учитывать перерывы осадконакопления и денудацию.

Расчет палеотемператур состоит из двух этапов. На первом, по распределению температур T , «наблюдаемых» в точках разреза скважины, рассчитывается тепловой поток q через поверхность основания осадочного чехла, т. е. решается обратная задача геотермии – классическая обратная задача геофизики. На втором этапе, с известным значением q , решаются прямые задачи геотермии – непосредственно рассчитываются температуры U в заданных точках осадочной толщи Z (в том числе в материнской свите) на любые заданные моменты геологического времени t .

Наличие перерывов в осадконакоплении и величины денудации оцениваются путем многовариантных расчетов при различных сценариях тектоно-седиментационной истории и последующего выбора сценария, отвечающего критериям адекватности и достоверности.

Основным критерием адекватности и предпочтительности результатов палеотемпературного моделирования выступает оптимальная согласованность («невязка») максимума расчетных геотемператур с «наблюдаемыми» температурами «максимального палеотермометра» – с температурами, определенными по ОСВ. В той же степени важна оптимальная «невязка» расчетных геотемператур и с «наблюдаемыми» пластовыми температурами. Оптимальная «невязка», принятая в классической разведочной геофизике, это средняя квадратичная разность расчетных и наблюдаемых значений, равная погрешности наблюдений [46, 47]. Эта погрешность порядка ± 2 °C.

Важным критерием достоверности результатов палеотемпературного моделирования является согласованность расчетных значений плотности теплового потока q с данными экспериментального определения плотности теплового потока на территории исследований.

В качестве критерия достоверности результатов моделирования принимается и степень согласованности очагов интенсивной генерации УВ, определяемых по геотемпературному критерию в материнской свите [48], с установленной геолого-разведкой нефтегазоносностью недр.

Результаты исследований и их анализ

Решение *прямых задач геотермии* выполнялось на 52 ключевых моментах геологического времени, соответствующих временам начала/завершения формирования каждой свиты, перекрывающих баженовскую, а также точкам «излома» векового хода температур на земной поверхности.

Ниже приводятся результаты моделирования геотермического режима осадочного разреза скважин Арктической 11, Средне-Ямальской 14 и Ростовцевской 64 (рисунок, табл. 4–6). Оценка адекватности и предпочтительности тектоно-седиментационной истории выполняется на основе анализа результатов палеотемпературных реконструкций 3-х сценариев: *1-й сценарий* – учет перерывов в осадконакоплении и позднеэоценовых размывов; *2-й сценарий* – учет перерывов в осадконакоплении, без учета эрозионных процессов; *3-й сценарий* – по тектоно-седиментационной истории, что и *2-й сценарий*, но моделирование выполнено без учета данных ОСВ.

В случае учета эрозионных процессов при моделировании (табл. 4–6, *сценарий 1*) по критерию «невязки» измеренных (наблюденных) и расчетных геотемператур *результаты являются адекватными и приемлемыми*: «невязки» оптимальны, т. к. составляют $\pm 2^\circ\text{C}$. Таким образом, размывы палеоген-неогеновых и неогеновых отложений подтверждаются. А результаты моделирования без учета эрозионных процессов (табл. 4–6, *сценарий 2*) однозначно неприемлемы, «невязки» составляют $\pm(5-12-16)^\circ\text{C}$.

Достоверность результатов палеотемпературного моделирования при учете эрозионных процессов (*сценарий 1*), выполненного на Арктической, Средне-Ямальской и Ростовцевской площадях, подтверждается хорошей согласованностью полученных расчетных значений плотности теплового потока ($49-52-56 \text{ мВт/м}^2$) с экспериментальными определениями плотности теплового потока для п-ва Ямал: $50-55 \text{ мВт/м}^2$ [36], $49-56 \text{ мВт/м}^2$ [39]. Здесь следует заметить, что для геодинамических условий Западной Сибири, характеризующихся, начиная с юрского времени, квазистационарностью глубинного теплового q [24, 36, 49], решение обратной задачи геотермии – определения плотности теплового потока q – выполняется однозначно [46].

Таблица 4. Сопоставление измеренных и расчетных геотемпературных параметров (скважина Арктическая 11)

Table 4. Comparison of the measured and calculated geotemperature parameters (Arkticheskaya well 11)

Глубина, м Depth, m	Измеренные температуры $^\circ\text{C}$, Measured («observed») temperatures	Способ измерения Measurement method	Расчетные температуры Calculated temperatures, $^\circ\text{C}$					
			сценарий 1 script 1		сценарий 2 script 2		сценарий 3 script 3	
			Значение Value	Разница с измеренной Difference with the measured	Значение Value	Разница с измеренной Difference with the measured	Значение Value	Разница с измеренной Difference with the measured
2500	120	по ОСВ by VR (vitrinite reflectance)	117	-3	99	-21	-	-
3533	125	пластовые reservoir	126	+1	138	+13	125	0
3560	126	пластовые reservoir	127	+1	138	+12	126	0
Среднеквадратическое отклонение («невязка»), $^\circ\text{C}$ Mean squared error («true error»), $^\circ\text{C}$			± 2		± 16		± 0	
Расчетный тепловой поток из основания, мВт/м^2 Calculated heat flux from the basis, mW/m^2			56		55		56	
Глубина положения баженовской свиты в современном разрезе, м Depth of position of the Bazhenov suite in the modern section, m			2800		2800		2800	
Расчетная современная температура баженовской свиты, $^\circ\text{C}$ Calculated current temperature of the Bazhenov suite, $^\circ\text{C}$			101		99		100	
Глубина положения баженовской свиты в палеоразрезе (18,5 млн лет назад) в момент палеотемпературного максимума ГФН, м Depth of position of the Bazhenov suite in the paleosection (18,5 million years ago) at the time of the main oil generation phase paleotemperature maximum, m			3055		2697		2697	
Расчетный палеотемпературный максимум ГФН баженовской свиты, $^\circ\text{C}$ Calculated paleotemperature maximum of the main oil generation phase of the Bazhenov suite, $^\circ\text{C}$			128		109		110	

В части положительного заключения о *достоверности результатов* моделирования при учете денудаций отметим, что расчетный максимум гео-

температур баженовской свиты (табл. 4, сценарий 1, 128 °С) более всего согласуется с установленным геологоразведкой фактом – с определением ОСВ в баженовской свите, свидетельствующим о том, что в пределах Арктической площади баженовская свита находится/находилась в конце главной фазы нефтеобразования (ГФН).

Таблица 5. Сопоставление измеренных и расчетных геотемпературных параметров (скважина Средне-Ямальская 14)

Table 5. Comparison of the measured and calculated geotemperature parameters (Sredne-Yamalskaya well 14)

Глубина, м, Depth, m	Измеренные температуры °С, Measured («observed») temperatures, °C	Способ измерения Measurement method	Расчетные температуры Calculated temperatures °C			
			сценарий 1 script 1		сценарий 2 script 2	
			Значение Value	Разница с измеренной Difference with the measured	Значение Value	Разница с измеренной Difference with the measured
1700	83	по ОСВ	81	-2	77	-6
2200	100	by VR (vitrinite reflectance)	98	-2	96	-4
3000	120		123	+3	126	+6
Среднеквадратическое отклонение («невязка»), °С Mean squared error («true error»), °C			±2		±5	
Расчетный тепловой поток из основания, мВт/м ² Calculated heat flux from the basis, MW/m ²			52		60	
Глубина положения баженовской свиты в современном разрезе, м Depth of position of the Bazhenov suite in the modern section, m			2870		2870	
Расчетная современная температура баженовской свиты, °С Calculated current temperature of the Bazhenov suite, °C			94		110	
Глубина положения баженовской свиты в палеоразрезе (18,5 млн лет назад) в момент палеотемпературного максимума ГФН, м Depth of position of the Bazhenov suite in the paleosection (18,5 million years ago) at the time of the main oil generation phase paleotemperature maximum, m			3108		2799	
Расчетный палеотемпературный максимум ГФН баженовской свиты, °С Calculated paleotemperature maximum of the main oil generation phase of the Bazhenov suite, °C			119		121	

Таким образом, результаты выполненных палеотектонических и палеотемпературных реконструкций аргументировано свидетельствуют о том, что в палеоген-неогене осадконакопление шло до

Таблица 6. Сопоставление измеренных и расчетных геотемпературных параметров (скважина Ростовцевская 64)

Table 6. Comparison of the measured and calculated geotemperature parameters (Rostovtsevskaya well 64)

Глубина, м, Depth, m	Измеренные температуры °С, Measured («observed») temperatures, °C	Способ измерения Measurement method	Расчетные температуры Calculated temperatures, °C					
			сценарий 1 script 1		сценарий 2 script 2		сценарий 3 script 3	
			Значение Value	Разница с расчетной Difference with the calculated	Значение Value	Разница с расчетной Difference with the calculated	Значение Value	Разница с расчетной Difference with the calculated
2096	84	по ОСВ	84	0	73	-11	-	-
2600	98	by VR (vitrinite reflectance)	99	+1	88	-10	-	-
2827	111		106	-5	95	-16	-	-
2470	75	пластовые reservoir	77	+2	87	+12	76	+1
2650	81		82	+1	92	+11	80	-1
2660	81		82	+1	93	+12	81	0
Среднеквадратическое отклонение («невязка»), °С Mean squared error («true error»), °C			±2		±1		±1	
Расчетный тепловой поток из основания, мВт/м ² Calculated heat flux from the basis, mW/m ²			49		47		48	
Глубина положения баженовской свиты в современном разрезе, м Depth of position of the Bazhenov suite in the modern section, m			3180		3180		3180	
Расчетная современная температура баженовской свиты, °С Calculated current temperature of the Bazhenov suite, °C			98		93		96	
Глубина положения баженовской свиты в палеоразрезе (18,5 млн лет назад) в момент палеотемпературного максимума ГФН, м Depth of position of the Bazhenov suite in the paleosection (18,5 million years ago) at the time of the main oil generation phase paleotemperature maximum, m			3247		3080		3080	
Расчетный палеотемпературный максимум ГФН баженовской свиты, °С Calculated paleotemperature maximum of the main oil generation phase of the Bazhenov suite, °C			117		105		107	

середины миоцена на протяжении 31,9 млн л (нюрольская, тавдинская, атлымская, новомихайловская, туртасская, абросимовская свиты) в объеме 335 м (площадь Ростовцевская), 435 м (площадь Средне-Ямальская), 535 м (площадь Арктическая) и за 4 млн лет, в раннебищеульское время, эти отложения были размыты. Ингрессиям бореального моря в среднем миоцене – раннем плиоцене, с конца бищеульского времени и до конца новопортовского, обязаны накопления осадков толщиной 113 м, которые, в последующий этап положительных тектонических движений, за 1,3 млн лет денудировались. С началом позднего миоцена идет накопление плиоцен-четвертичных осадков.

Отдельного рассмотрения заслуживает анализ результатов моделирования (табл. 4 и 6, *сценарий 3*), выполненного без учета денудаций и без учета температур по ОСВ в качестве измеренных («наблюденных»). И по критерию «невязки», и по согласованности расчетной плотности теплового потока с экспериментальными его определениями результаты моделирования представляются формально адекватными и достоверными. Однако такая адекватность и достоверность только кажущаяся в приложении к тектоно-седиментационной истории, т. к. в палеотемпературных реконструкциях игнорированы фактические данные – представленные определения ОСВ в образцах керна. И это в итоге приводит к заметному занижению расчетного палеотемпературного максимума ГФН – на (10–18)°С.

Сценарий 3 интересен тем, что позволяет оценить корректность результатов моделирования в случае, когда данные ОСВ отсутствуют или игнорируются по какой-либо причине. Отметим исключительную важность использования данных ОСВ для выявления и оценки денудационных процессов. Именно привлечение данных ОСВ (*сценарий 2*) указало на большую вероятность существования позднеэоценовых денудаций, а в *сценарии 1* привлечение данных ОСВ дало оценку масштабам денудаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конторович А.Э., Эдер Л.В. Новая парадигма стратегии развития сырьевой базы нефтедобывающей промышленности Российской Федерации // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2015. – № 5. – С. 8–17.
2. Конторович А.Э. Проблемы реиндустриализации нефтегазового комплекса России // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 3. – С. 14–15.
3. Tissot B. Preliminary Data on the Mechanisms and Kinetics of the Formation of Petroleum in Sediments. Computer Simulation of a Reaction Flowsheet // Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP. – 2003. – V. 58. – № 2. – P. 183–202.
4. Galushkin Y.I., Sitar K.A., Kunitsyna A.V. Numerical modeling of the organic matter transformation in the sedimentary rocks of the northeastern Sakhalin shelf // Oceanology. – 2011. – V. 51. – № 3. – P. 491–501.
5. Прищепа О.М., Суханов А.А., Макарова И.Р. Методика определения зрелости сапропелевого органического вещества в до-

Выводы

1. Принятая вариативность сценариев тектоно-седиментационной истории и реконструкций геотермического режима баженовской свиты позволили выявить, количественно оценить перемены в осадконакоплении и денудации в позднеэоценовое время на месторождениях углеводородов п-ва Ямал.
2. Специальная методика выявления и оценки денудаций основывается на: 1) палеотемпературном моделировании, учитывающем параметры тектоно-седиментационной истории, измеренные пластовые температуры и палеотемпературы, определенные по ОСВ; 2) многовариантности палеотектонических и палеотемпературных реконструкций и на анализе варибельности результатов; 3) оценке соответствия результатов общепринятым критериям оптимальности решения обратной задачи геофизики; 4) согласованности расчетных значений плотности теплового потока с экспериментальными данными; 5) согласованности расчетных очагов генерации УВ с установленной геологоразведкой нефтегазоносностью недр.
3. Отмечена важность использования данных ОСВ для выявления и оценки денудационных процессов. Именно привлечение данных ОСВ может указать на вероятность существования денудаций и дать оценку масштабам денудаций.
4. Сценарий истории геологического развития арктического региона Западной Сибири, учитывающий эрозионные процессы, представляет наиболее «богатую» термическую историю материнских отложений, а следовательно, повышает достоверность, обеспечивает наибольшую расчетную плотность ресурсов генерированных нефтей. Возможность выявления перерывов осадконакопления и денудации методом геотермии, в комплексе с геологическими методами и сейсморазведкой, существенно повышает достоверность знаний об истории геологического развития регионов Западной Сибири.

маникитах и оценка их углеводородных ресурсов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2015. – № 7. – С. 4–8.

6. Типы и катагенез органического вещества баженовской свиты и ее возрастных аналогов / И.В. Гончаров, В.В. Самойленко, С.В. Обласов, С.В. Фадеева, М.А. Веклич, Р.С. Кашапов, П.В. Трушков, Е.С. Бахтина // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 10. – С. 20–25.
7. Морозов Н.В., Бельнская И.Ю., Жуков В.В. 3D моделирование углеводородных систем баженовской свиты: детализация прогноза физико-химических свойств углеводородов // ПРО-НЕФТЬ. – 2016. – Вып. 1. – С. 38–45.
8. Stotskiy V.V., Isaev V.I., Fomin M.A. An assessment of the geotemperature conditions of Bazhenov oil generation (Koltogor mezodepression and its framing structures) // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 43. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/43/1/012017/pdf> (дата обращения: 05.03.2017).

9. Нестеров И.И. Проблемы геологии нефти и газа второй половины XX века: избранные труды. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 608 с.
10. Гаврилов В.Л., Галушкин Ю.И. Геодинамический анализ нефтегазоносных бассейнов (бассейновое моделирование). – М.: Недра, 2010. – 227 с.
11. Influence of Surface Temperatures on Source Rock Maturity: an Example from the Russian Arctic / S. Nelskamp, T. Donders, J.-D. van Wess, O. Abbink // *ROGTEC*. – 2014. – № 18. – P. 26–35.
12. Tectonic structure and history of evolution of the West Siberian geosyncline in the Mesozoic and Cenozoic / V.A. Kontorovich, S.Yu. Belyaev, A.E. Kontorovich, V.O. Krasavchikov, A.A. Kontorovich, O.I. Suprunenko // *Russian Geology and Geophysics*. – 2001. – V. 42. – P. 1832–1845.
13. История тектонического развития арктических районов Западно-Сибирской геосинеклизы в кайнозойское время / С.Ю. Беляев, С.А. Гуськов, В.С. Волкова, А.В. Истомин // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2013. – № 1. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-tektonicheskogo-razvitiya-arkticheskikh-rayonov-zapadno-sibirskoy-geosineklizy-v-kaynozoyskoye-vremya> (дата обращения: 05.03.2017).
14. Volkova V.S. Geologic stages of the paleogene and neogene evolution of the Arctic shelf in the Obr region (West Siberia) // *Russian Geology and Geophysics*. – 2014. – V. 55. – № 4. – P. 619–633.
15. Гуськов С.А., Волкова В.С. История геологического развития арктических районов Западно-Сибирской геосинеклизы в кайнозойское время // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2014. – № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-geologicheskogo-razvitiya-arkticheskikh-rayonov-zapadno-sibirskoy-geosineklizy-v-kaynozoyskoye-vremya> (дата обращения: 05.03.2017).
16. Шериф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка: Т. 2. Обработка и интерпретация данных. – М.: Мир, 1987. – 400 с.
17. Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность мезозойско-кайнозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 253 с.
18. Veselov O.V., Kozlov D.N. Geothermal and bathymetric surveys of Brouton Bay (Uratman Volcano, Simushir I., Kuril Islands) // *Journal of Volcanology and Seismology*. – 2014. – V. 8. – № 4. – P. 250–259.
19. Галушкин Ю.И. Моделирование осадочных бассейнов и оценка их нефтегазоносности. – М.: Научный Мир, 2007. – 456 с.
20. Golovanova I.V., Salzmanova R.Yu., Tagirova Ch.D. Method for deep-temperature estimation with regard to the paleoclimate influence on the heat flow // *Russian Geology and Geophysics*. – 2014. – V. 55. – № 9. – P. 1426–1435.
21. Геотермические разрезы земной коры области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов и смежных платформ / П.Ю. Горнов, М.В. Горошко, Ю.Ф. Мальшев, В.Я. Подгорный // *Геология и геофизика*. – 2009. – Т. 50. – № 5. – С. 630–647.
22. Demezhko D.Yu., Gornostaeva A.A. Reconstructions of long-term ground surface heat flux changes from deep-borehole temperature data // *Russian Geology and Geophysics*. – 2014. – V. 55. – № 12. – P. 1841–1846.
23. Теплопроводность пород баженовской свиты Салымского района (Западно-Сибирская плита) / А.Д. Дучков, Л.С. Соколова, Д.Е. Аюнов, П.А. Ян // *Геология и геофизика*. – 2016. – Т. 57. – № 7. – С. 1367–1380.
24. Ермаков В.И., Скоробогатов В.А. Тепловое поле и нефтегазоносность молодых плит СССР. – М.: Недра, 1986. – 222 с.
25. Зуй В.И. Тепловое поле платформенного чехла Беларуси. – Минск: Экономпресс, 2013. – 260 с.
26. Isaev V.I., Lobova G.A., Osipova E.N. The oil and gas contents of the Lower Jurassic and Achimovka reservoirs of the Nyurolrka megadepression // *Russian Geology and Geophysics*. – 2014. – V. 55. – P. 1418–1428.
27. Historical-geological modeling of hydrocarbon generation in the mesozoic–cenozoic sedimentary basin of the Kara sea (basin modeling) / A.E. Kontorovich, L.M. Burshtein, N.A. Malyshev, P.I. Safronov, S.A. Gus'kov, S.V. Ershov, V.A. Kazanenko, N.S. Kim, V.A. Kontorovich, E.A. Kostyeva, V.N. Melenevsky, V.R. Livshits, A.A. Polyakov, M.B. Skvortsov // *Russian Geology and Geophysics*. – 2013. – V. 54. – № 8. – P. 1179–1226.
28. Kutas R.I. Heat flow, radiogenic heat and crustal thickness in southwest U.S.S.R. // *Tectonophysics*. – 1984. – V. 103. – № 1–4. – P. 167–174.
29. Results of heat flow measurement in the NW sector of the Black Sea basin / R.I. Kutas, V.P. Kobolev, V.Y. Tsvyashchenko, M.I. Bevzyuk, O.P. Kravchuk // *Geophysical Journal*. – 1999. – V. 19. – № 2. – P. 289–308.
30. Kutas R.I., Poort J. Regional and local geothermal conditions in the northern Black Sea // *International Journal of Earth Sciences*. – 2008. – V. 97. – № 2. – P. 353–363.
31. Petroleum potential of Lower Jurassic deposits in Nurolsk megadepression / G. Lobova, E. Osipova, V. Isaev, D. Terre // *Scientific and Technical Challenges in the Well Drilling Progress. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2015. – V. 24. URL: http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012001/pdf/1755-1315_24_1_012001.pdf (дата обращения: 05.03.2017).
32. Лопатин Н.В. Концепция нефтегазовых генерационно-аккумуляционных систем как интегрирующее начало в обосновании поисково-разведочных работ // *Геоинформатика*. – 2006. – № 3. – С. 101–120.
33. Thermal structure of the crust in the Black Sea: comparative analysis of magnetic and heat flow data / V.I. Starostenko, M.N. Dolmaz, R.I. Kutas, O.M. Rusakov, E. Oksum, Z.M. Hisarli, M. Okyar, U.Y. Kalyoncuoglu, H.E. Tutunsatar, O.V. Legostaeva // *Marine Geophysical Research*. – 2014. – V. 35. – № 4. – P. 345–359.
34. Iskorkina A.A., Isaev V.I., Fomin A.N. Influences of Neo-Pleistocene permafrost on thermal history of petromaternal Lower Jurassic Togur suite (Tomsk region) // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2016. – V. 43. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/43/1/012009/pdf> (дата обращения: 05.03.2017).
35. Курчиков А.Р., Ставицкий Б.П. Геотермия нефтегазоносных областей Западной Сибири. – М.: Недра, 1987. – 134 с.
36. Kurchikov A.R. The geothermal regime of hydrocarbon pools in West Siberia // *Russian Geology and Geophysics*. – 2001. – V. 42. – № 11–12. – P. 678–689.
37. Курчиков А.Р., Бородин В.Н. Термобарическая и палеотектоническая характеристика клиноформных образований ачимовской толщи севера Западной Сибири в связи с нефтегазоносностью // *Горные ведомости*. – 2010. – № 3. – С. 16–35.
38. Термографическая модель и прогноз нефтегазоносности осадочного чехла шельфа моря Лаптевых / М.Д. Хуторской, Л.В. Подгорный, О.И. Супруненко, Б.И. Ким, А.А. Черных // *Доклады Академии Наук*. – 2011. – Т. 440. – № 5. – С. 663–668.
39. Геотермия арктических морей / М.Д. Хуторской, В.Р. Ахмедзянов, А.В. Ермаков, Ю.Г. Леонов, Л.В. Подгорных, Б.Г. Поляк, Е.А. Сухих, Л.А. Цыбуля. – М.: ГЕОС, 2013. – 232 с.
40. Объемная геолого-геотермическая модель осадочного чехла северо-восточной части Баренцевоморского шельфа в связи с освоением ресурсов углеводородов / Д.С. Никитин, Д.А. Иванов, В.А. Журавлев, М.Д. Хуторской // *Георесурсы*. – 2015. – № 1. – С. 13–19.
41. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Кн. 9: Кайнозой Западной Сибири / под ред. В.С. Волковой. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 246 с.
42. Volkova V.S. Paleogene and neogene stratigraphy and paleotemperature trend of West Siberia (from palynological data) // *Russian Geology and Geophysics*. – 2011. – V. 52. – № 7. – P. 709–716.

43. Базы данных Государственных геологических карт ВСЕГЕИ. Карта дочетвертичных образований R (40)-41, R-43, 44(45). URL: <http://www.vsegei.ru/ru/info/georesource/> (дата обращения 25.05.2016).
44. Искоркина А.А. Палеоклиматические факторы реконструкции термической истории нефтематеринской баженовской свиты арктического региона Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 8. – С. 59–73.
45. Estimation of the Oil-and-Gas Potential of Sedimentary Depression in the Far East and West Siberia Based on Gravimetry and Geothermy Data / R.Yu. Gulenok, V.I. Isaev, V.Yu. Kosygin, G.A. Lobova, V.I. Starostenko // Russian Journal of Pacific Geology. – 2011. – V. 5. – № 4. – P. 273–287.
46. Тихоцкий С.А., Фокин И.В., Шур Д.Ю. Активная лучевая сейсмическая томография с использованием адаптивной параметризации системой вэйвлет-функций // Физика Земли. – 2011. – № 4. – С. 67–86.
47. Isaev V.I. Interpretation of High-Accuracy Gravity Exploration Data by Mathematic Programming // Russian Journal of Pacific Geology. – 2013. – V. 7. – № 2. – P. 92–106.
48. Модель катагенеза органического вещества (на примере баженовской свиты) / Л.М. Бурштейн, Л.В. Жидкова, А.Э. Конторович, В.Н. Меленевский // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. – № 6. – С. 1070–1078.
49. Эволюция температурного поля осадочного чехла Западно-Сибирской плиты / А.Д. Дучков, Ю.И. Галушкин, Л.В. Смирнов, Л.С. Соколова // Геология и геофизика. – 1990. – № 10. – С. 51–60.

Поступила 11.05.2017 г.

Информация об авторах

Исаев В.И., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геофизики Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Старостенко В.И., доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН Украины, директор Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины.

Лобова Г.А., доктор геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Фомин А.Н., доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геохимии нефти и газа Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Исагалиева А.К., преподаватель кафедры геофизики Института геологии и нефтегазового дела Казахского национального исследовательского технического университета им. К.И. Сатпаева.

UDC 553.98(571)

TECTONIC–SEDIMENTATION INTERPRETATION OF THE GEOTHERMICS DATA WHEN IDENTIFYING AND ASSESSING THE LATE EOCENE EROSION ON THE ARCTIC HYDROCARBON FIELDS (YAMAL PENINSULA)

Valeriy I. Isaev¹,
isaewi@tpu.ru

Vitaly I. Starostenko²,
vstar@igph.kiev.ua

Galina A. Lobova¹,
lobovaga@tpu.ru

Aleksandr N. Fomin³,
fominan@ipgg.sbras.ru

Aygul K. Issagaliyeva⁴,
a_isagaliyeva@mail.ru

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

² Institute of Geophysics named after S.I. Subbotin NAS Ukraine,
32, Palladin Avenue, Kiev, 03142, Ukraine.

³ Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A.A. Trofimuk SB RAS,
3, Ac. Koptueg Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

⁴ Institute of Geology and oil and gas business Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev,
22, Satpayev street, 050013, Almaty, Republic of Kazakhstan.

Relevance. *The scheme and criteria of use of the measured and modelled geo-temperatures is developed for studying of tectonic-sedimentation history of settling ponds of the Arctic region of Western Siberia – priority subject of the new strategy of development for a source of raw materials of hydrocarbons of the Russian Federation.*

The aim of the research *is to develop and approve a technique of assessment of the Late Eocene time erosion of the Arctic districts of the West Siberian oil-and-gas province on the basis of model operation of the geothermic mode of the Bazhenov petromaternal deposits, on the example of the Arctic, Sredne-Yamalsky and Rostovtsevsky fields.*

Object of researches: *tectonic-sedimentation history of a Cenozoic and Mesozoic section, the paleo thermic mode of the Bazhenov deposits opened with deep wells on the Arctic, Sredne-Yamalsky and Rostovtsevsky squares (Yamal Peninsula).*

A special method *of the research is based on: 1) the paleo-temperature modeling considering the parameters of tectonic-sedimentation history, measured rock temperatures and paleo-temperatures determined by the reflection power of vitrinite; 2) diversity of paleo-tectonic and the paleo-temperature reconstruction and on the analysis of variability of results; 3) assessment of results compliance with the optimality criteria of the geophysics inverse problem solution; 4) coherence of the designed values of heat flux density with the experimental data; 5) coherence of the calculated centers of hydrocarbon oscillation with the oil-and-gas content of a subsoil established by geological exploration.*

Research results. *The implemented variety of scenarios for tectono-sedimentary history and reconstructions of geothermal regime of the Bazhenov formation has revealed and given the quantification of breaks in sedimentation and denudate in epy Late Eocene time on hydrocarbon deposits of Yamal. It was ascertained that engaging the data of vitrinite reflectance justify the existence of denudations and defines the possibility of assessing the scales of denudations. The scenario of geological development history considering the erosive processes gives the «richest» thermal history of maternal deposits, provides the greatest calculated density of resources of the generated oil. Application of the developed scheme and criteria of identifying the breaks of sedimentation and denudation by a geothermal method, in complex with geological methods and seismic exploration, significantly increases reliability of knowledge of the history of geological development of regions in Western Siberia.*

Key words:

Tectonic-sedimentation history, geothermic mode, Bazhenov deposits, vitrinite reflectance, field of hydrocarbons of Yamal peninsula.

REFERENCES

1. Kontorovich A.E., Eder L.V. The new paradigm of the development strategy of the raw material base of the oil industry of the Russian Federation. *Mineral Resources of Russia. Economics and Management*, 2015, no. 5, pp. 8–17. In Rus.
2. Kontorovich A. E. Problems of reindustrialization of an oil and gas complex of Russia. *Oil Industry*, 2016, no. 3, pp. 14–15. In Rus.
3. Tissot B. Preliminary Data on the Mechanisms and Kinetics of the Formation of Petroleum in Sediments. Computer Simulation of a

- Reaction Flowsheet. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, 2003, vol. 58, no. 2, pp. 183–202.
4. Galushkin Y.I., Sitar K.A., Kunitsyna A.V. Numerical modeling of the organic matter transformation in the sedimentary rocks of the northeastern Sakhalin shelf. *Oceanology*, 2011, vol. 51, no. 3, pp. 491–501.
 5. Prishchepa O.M., Sukhanov A.A., Makarova I.R. Method for determining the maturity of sapropelic organic matter in domanic and assessing their hydrocarbon resources. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2015, no. 7, pp. 4–8. In Rus.
 6. Goncharov I.V., Samoylenko V.V., Oblasov S.V., Fadeeva S.V., Veklich M.A., Kashapov R.S., Trushkov P.V., Bakhtina E.S. Types and catagenesis of the organic matter of the Bazhenov suite and its age analogues. *Oil Industry*, 2016, no. 10, pp. 20–25. In Rus.
 7. Morozov N.V., Belenkaya I.Yu., Zhukov V.V. 3D modelirovaniye uglevodorodnykh sistem bazhenovskoy svity: detalizatsiya prognoza fiziko-khimicheskikh svoystv uglevodorodov [3D modeling of hydrocarbon systems of the Bazhenov suite: details of the forecast of physical and chemical properties of hydrocarbons]. *PROheft*, 2016, no. 1, pp. 38–45. In Rus.
 8. Stotskiy V.V., Isaev V.I., Fomin M.A. An assessment of the geotemperature conditions of Bazhenov oil generation (Koltogor mezodepression and its framing structures). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/43/1/012017/pdf> (accessed 5 March 2017).
 9. Nesterov I.I. *Problemy geologii nefii i gaza vtoroy poloviny XX-go veka: izbrannye trudy* [Problems of petroleum geology in the second half of the XXth century: selected works]. Novosibirsk, SB RAS Publ. House, 2007. 607 p.
 10. Gavrilo V.L., Galushkin Yu.I. *Geodinamicheskiy analiz neftegazonosnykh basseynov (basseynovoye modelirovaniye)* [Geodynamic analysis of oil and gas basins (basin modeling)]. Moscow, Nedra Publ., 2010. 227 p.
 11. Nelskamp S., Donders T., van Wess J.-D., Abbink O. Influence of Surface Temperatures on Source Rock Maturity: An Example from the Russian Arctic. *ROGTEC*, 2014, no. 18, pp. 26–35.
 12. Kontorovich V. A., Belyaev S. Yu., Kontorovich A. E., Kravchikov V. O., Kontorovich A. A., Suprunenko O. I. Tectonic structure and history of evolution of the West Siberian geosyncline in the Mesozoic and Cenozoic. *Russian Geology and Geophysics*, 2001, vol. 42, pp. 1832–1845.
 13. Belyaev S.Yu., Guskov S.A., Volkova V.S., Istomin A.V. Istoriya tektonicheskogo razvitiya arkticheskikh rayonov Zapadno-Sibirskoy geosineklizy v kaynozoyzskoe vremya [History of tectonic development of the Arctic districts of the West Siberian geosyncline in Cenozoic]. *Interespo Geo-Siberia*. 2013, no. 1. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-tektonicheskogo-razvitiya-arkticheskikh-rayonov-zapadno-sibirskoy-geosineklizy-v-kaynozoyzskoe-vremya> (accessed 5 March 2017).
 14. Volkova V.S. Geologic stages of the paleogene and neogene evolution of the Arctic shelf in the Obr' region (West Siberia). *Russian Geology and Geophysics*. 2014, vol. 55, no. 4, pp. 619–633.
 15. Guskov S.A., Volkova V.S. Istoriya geologicheskogo razvitiya arkticheskikh rayonov Zapadno-Sibirskoy geosineklizy v kaynozoyzskoe vremya [Geological history of the Arctic regions of the West Siberian geosyncline in Cenozoic]. *Interespo Geo-Siberia*, 2014, no. 2. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-geologicheskogo-razvitiya-arkticheskikh-rayonov-zapadno-sibirskoy-geosineklizy-v-kaynozoyzskoe-vremya> (accessed 5 March 2017).
 16. Sherif R., Geldart L. *Seysmorazvedka: T. 2. Obrabotka i interpretatsiya dannykh* [Seismic exploration: vol. 2. Data processing and interpretation]. Moscow, Mir Publ., 1987. 240 p.
 17. Kontorovich V.A. *Tektonika i neftegazonosnost mezozoyzskoy-kaynozoyzskikh otlozheniy yugo-vostochnykh rayonov Zapadnoy Sibiri* [Tectonics and oil-and-gas bearing of the Mesozoic-Cenozoic deposits in southeastern of the Western Siberia]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2002. 253 p.
 18. Veselov O.V., Kozlov D.N. Geothermal and bathymetric surveys of Brouton Bay (Uratman Volcano, Simushir I., Kuril Islands). *Journal of Volcanology and Seismology*, 2014, vol. 8, no. 4, pp. 250–259.
 19. Galushkin Yu.I. *Modelirovaniye osadochnykh basseynov i otsenka ikh neftegazonosnosti* [Modeling decantation basins and assessment of their petroleum potential]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2007. 456 p.
 20. Golovanova I.V., Salrmanova R.Yu., Tagirova Ch.D. Method for deep-temperature estimation with regard to the paleoclimate influence on the heat flow. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 9, pp. 1426–1435.
 21. Gornov P.Yu., Goroshko M.V., Malyshev Yu.F., Podgorniy V.Ya. Thermal structure of lithosphere in Central Asian and Pacific belts and their adjacent cratons. *Russian Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 5, pp. 630–647. In Rus.
 22. Demezhko D.Yu., Gornostaeva A.A. Reconstructions of long-term ground surface heat flux changes from deep-borehole temperature data. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 12, pp. 1841–1846.
 23. Duchkov D.A., Sokolova L.S., Ayunov D.E., Yan L.A. Thermal conductivity of the Bazhenov formation rocks in the Salym area (West Siberian Plate). *Russian Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, no. 7, pp. 1367–1380. In Rus.
 24. Ermakov V.I., Skorobogatov V.A. *Teplovoe pole i neftegazonosnost molodykh plit SSSR* [Thermal field and oil and gas content of the young plates of the USSR]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 222 p.
 25. Zuy V.I. *Teplovoe pole platformennogo chekhla Belarusi* [Thermal field of the platform cover of Belarus]. Minsk, Ekonompress Publ., 2013. 260 p.
 26. Isaev V.I., Lobova G.A., Osipova E.N. The oil and gas contents of the Lower Jurassic and Achimovka reservoirs of the Nyurolrka megadepression. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, pp. 1418–1428.
 27. Kontorovich A.E., Burshtein L.M., Malyshev N.A., Safronov P.I., Gusrkov S.A., Ershov S.V., Kazanenko V.A., Kim N.S., Kontorovich V.A., Kostyreva E.A., Melenevsky V.N., Livshits V.R., Polyakov A.A., Skvortsov M.B. Historical-geological modeling of hydrocarbon generation in the mesozoic-cenozoic sedimentary basin of the Kara sea (basin modeling). *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 8, pp. 1179–1226.
 28. Kutas R.I. Heat flow, radiogenic heat and crustal thickness in southwest U.S.S.R. *Tectonophysics*, 1984, vol. 103, no. 1–4, pp. 167–174.
 29. Kutas R.I., Kobleev V.P., Tsyvashchenko V.Y., Bevzyuk M.I., Kravchuk O.P. Results of heat flow measurement in the NW sector of the Black Sea basin. *Geophysical Journal*, 1999, vol. 19, no. 2, pp. 289–308.
 30. Kutas R.I., Poort J. Regional and local geothermal conditions in the northern Black Sea. *International Journal of Earth Sciences*, 2008, vol. 97, no. 2, pp. 353–363.
 31. Lobova G., Osipova E., Isaev V., Terre D. Petroleum potential of Lower Jurassic deposits in Nurolsk megadepression. *Scientific and Technical Challenges in the Well Drilling Progress. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 24. Available at: http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012001/pdf/1755-1315_24_1_012001.pdf (accessed 5 March 2017).
 32. Lopatin N.V. The concept of oil and gas generative and accumulative systems as the integrating beginning in justification of exploration. *Geoinformatika*, 2006, no. 3, pp. 101–120. In Rus.
 33. Starostenko V.I., Dolmaz M.N., Kutas R.I., Rusakov O.M., Oksum E., Hisarli Z.M., Okyar M., Kalyoncuoglu U.Y., Tutunsatar H.E., Legostaeva O.V. Thermal structure of the crust in the

- Black Sea: comparative analysis of magnetic and heat flow data. *Marine Geophysical Research*, 2014, vol. 35, no. 4, pp. 345–359.
34. Iskorkina A.A., Isaev V. I., Fomin A. N. Influences of Neo-Pleistocene permafrost on thermal history of petromaternal Lower Jurassic Togur suite (Tomsk region). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/43/1/012009/pdf> (accessed 5 March 2017).
 35. Kontorovich V.A. *Tektonika i neftegazonosnost mezozoysko-kaynozoysskikh otlozheniy yugo-vostochnykh rayonov Zapadnoy Sibiri* [Tectonics and oil-and-gas bearing of the Mesozoic-Cenozoic deposits in southeastern of the Western Siberia]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2002, 253 p.
 36. Kurchikov A.R. The geothermal regime of hydrocarbon pools in West Siberia. *Russian Geology and Geophysics*, 2001, vol. 42, no. 11–12, pp. 678–689.
 37. Kurchikov A.R., Borodkin V.N. Thermobaric and paleotectonic characteristics of the clinofom formations of the Achimov strata of the north of Western Siberia in connection with the oil and gas content. *Gornye vedomosti*, 2010, № 3, pp. 16–35. In Rus.
 38. Khutorskoy M.D., Podgorny L.V., Suprunenko O.I., Kim B.I., Chernykh A.A. Thermographic model and forecast of oil and gas content of the sedimentary cover of the Laptev shelf. *Doklady Akademii Nauk*, 2011, vol. 440, no. 5, pp. 663–668. In Rus.
 39. Khutorskoy M.D., Akhmedzyanov V.R., Ermakov A.V., Leonov Yu.G., Podgornykh L.V., Polyak B.G., Sukhikh E.A., Cybulya L.A. *Geotermiya arkticheskikh morey* [Geothermic of the Arctic Seas]. Ed. by Yu.G. Leonov. Moscow, GEOS Publ., 2013. 232 p.
 40. Nikitin D.S., Ivanov D.A., Zhuravlev V.A., Khutorskoy M.D. Obemnaya geologo-geotermicheskaya model osadochnogo chekhla severo-vostochnoy chasti Barentsevomorskogo shelfa v svyazi s osvoyeniem resursov uglevodorodov [Three-dimensional geological and geothermal model of sedimentary cover in the north-eastern part of the Barents Sea shelf in connection with the development of hydrocarbon resources]. *Georesursy – Georesources*, 2015, no. 1 (60), pp. 13–19.
 41. *Stratigrafiya neftegazonosnykh basseynov Sibiri. Kn. 9: Kaynozoy Zapadnoy Sibiri* [Stratigraphy of oil and gas bearing basins of Siberia. B. 9: The Cenozoic of Western Siberia]. Ed. by V.S. Volkova. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2002. 246 p.
 42. Volkova V.S. Paleogene and neogene stratigraphy and paleotemperature trend of West Siberia (from palynological data). *Russian Geology and Geophysics*, 2011, vol. 52, no. 7, pp. 709–716.
 43. *Bazy dannykh Gosudarstvennykh geologicheskikh kart VSEGEI. Karta dochetvertichnykh obrazovaniy R (40)-41, R-43, 44(45)* [Databases of the State geological map of VSEGEI. Map structures pre-Quaternary R (40)-41, R-43, 44 (45)]. Available at: <http://www.vsegei.ru/ru/info/georesource/> (accessed 25 May 2016).
 44. Iskorkina A.A. Paleoclimate factors of reconstruction of thermal history of the petromaternal Bazhenov shale of the Arctic region of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 8, pp. 59–73. In Rus.
 45. Gulenok R.Yu., Isaev V.I., Kosygin V.Yu., Lobova G.A., Starostenko V.I. Estimation of the Oil-and-Gas Potential of Sedimentary Depression in the Far East and West Siberia Based on Gravimetry and Geothermy Data. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2011, vol. 5, no. 4, pp. 273–287.
 46. Tikhotskiy S.A., Fokin I.V., Shur D.Yu. Active beam seismic tomography with the use of adaptive parametrization by the system of wavelet functions. *Fizika Zemli – Physics of the Earth*, 2012, no. 4, pp. 67–86. In Rus.
 47. Isaev V.I. Interpretation of High-Accuracy Gravity Exploration Data by Mathematic Programming. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2013, vol. 7, no. 2, pp. 92–106.
 48. Burshteyn L.M., Zhidkova L.V., Kontorovich A.E., Melenevskiy V.N. The model of katagenesis of organic matter (for example, the Bazhenov Formation). *Russian Geology and Geophysics*, 1997, vol. 38, no. 6, pp. 1070–1078. In Rus.
 49. Duchkov A.D., Galushkin Yu.I., Smirnov L.V., Sokolova L.S. Evolution of temperature field of the sedimentary cover of the West Siberian plate. *Russian Geology and Geophysics*, 1990, vol. 10, pp. 51–60. In Rus.

Received: 11 May 2017.

Information about the authors

Valeriy I. Isaev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vitaly I. Starostenko, Dr. Sc., professor, Academician of NASU, Institute of Geophysics named after S.I. Subbotin NAS Ukraine.

Galina A. Lobova, Dr. Sc., associate professor, Tomsk Polytechnic University.

Aleksandr N. Fomin, Dr. Sc., head of the laboratory, Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A.A. Trofimuk SB RAS.

Aygul K. Issagaliyeva, Lecturer, Institute of Geology and oil and gas business Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev.

УДК 543.3:[546.28:+543.422]

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРЕМНИЯ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ СПОСОБОВ ПРОБОПОДГОТОВКИ

Бекбулатова Индира Абдумоминовна¹,
bekbulatova_indira@mail.ru

Скворцова Лидия Николаевна¹,
lnskvorcova@inbox.ru

Щёголева Ирина Сергеевна²,
irinamazurova@inbox.ru

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

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

Актуальность работы обусловлена созданием высокочувствительных современных экспрессных методик определения растворимого кремния в природных водах доступными физико-химическими методами анализа.

Цель работы: современные способы пробоподготовки природных вод с применением ультразвуковых и ультрафиолетовых полей, фотоактивных каталитических систем для разрушения поликремниевых кислот и комплексов кремния с гуминовыми веществами при определении общего содержания растворимых форм кремния спектрофотометрическим методом анализа.

Методы исследования: спектрофотометрия, ИК-спектроскопия, масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой.

Результаты. Для создания современных эффективных способов пробоподготовки природных вод при определении растворимого кремния спектрофотометрическим методом в виде жёлтого кремниймолибденового комплекса с применением референтной методики изучены возможности ультразвукового и ультрафиолетового излучений, фотокаталитической системы Фентона для разрушения поликремниевых кислот и комплексов кремния с гуминовыми веществами. Показано, что наиболее эффективным способом пробоподготовки является фотохимическая система Фентона. Разработанная методика пробоподготовки применена для анализа термальных и болотных вод на содержание растворимого кремния методом спектрофотометрии. Правильность методики доказана сопоставлением полученных результатов с результатами анализа вод методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (MS-ISP) с использованием норматива контроля. В условиях ультрафиолетового излучения происходит разрушение поликремниевых кислот, что можно использовать для количественной оценки различных форм кремниевых кислот методом спектрофотометрии. Установлено, что ультразвуковое излучение не позволяет контролировать методом спектрофотометрии все растворимые формы кремния.

Ключевые слова:

Кремний, полимерные формы кремниевых кислот, коллоидные формы кремния, пробоподготовка, ультрафиолетовое излучение, ультразвуковые колебания, гуминовые вещества, болотные воды, метод молекулярной спектрофотометрии.

Введение

Растворимые соединения кремния играют важную роль в процессах обмена веществ в живых системах. Физиологически значимые количества кремния для здоровья человека составляют не более 10 мг/дм³ (ПДК). Недостаточное или избыточное поступление кремния в организм человека может служить причиной возникновения ряда заболеваний, в частности сердечно-сосудистых, мочекаменных. Поэтому содержание кремния, относящегося ко второму классу опасности, в питьевой воде стали регламентировать с 1996 г.

В природных водах кремний может находиться в растворенном или коллоидном состоянии [1–4]. Основными растворимыми формами кремния являются производные ортокремниевой (H₄SiO₄) и метакремниевой (H₂SiO₃) кислот. Известно, что кремневые кислоты склонны к полимеризации, поэтому в воде наряду с мономерами могут существовать димерные H₂Si₂O₅ и H₁₀Si₂O₉ и полимерные формы. При изучении форм нахождения

кремния в почвенных водах авторы [5] рассматривают равновесия между мономерными и поликремниевыми кислотами в водных системах через образование промежуточных и нестабильных низкомолекулярных олигомерных форм кремневой кислоты. [6]. Процессы полимеризации кремниевых кислот в значительной степени зависят от кислотности, концентрации кремния и солевого состава раствора.

В поверхностных водах кремний также может находиться в форме устойчивых растворимых кремнийорганических производных, прежде всего соединений кремниевых кислот с гуминовыми веществами (ГВ). По мнению авторов [7, 8], соединения кремниевых кислот с гуминовыми кислотами (ГК) образуются по донорно-акцепторному механизму, а с фульвокислотами (ФК) – посредством водородных связей. В работе [9] обнаружена высокая растворимость кремния в щелочной среде вследствие образования химически устойчивых соединений с гуминовыми кислотами с наличием

эфирной связи Si-O-C. Данные соединения могут разлагаться ферментативно до свободной монокремниевой кислоты и органических остатков гуминовых кислот. Образование кремнийорганических соединений при взаимодействии кремния с гуминовыми кислотами также обсуждается авторами работы [10].

Определение содержания кремния в водах различной природы чаще всего проводят методом Маллена и Райли (1979 г.) с молибдатом аммония в форме жёлтого кремниймолибденового комплекса (КМК). Концентрацию кремния с использованием данной реакции определяют спектрофотометрическим методом (СФ) по референтной методике, позволяющей контролировать мономерно-димерные формы кремния [11]. При изучении роли подвижных соединений кремния в растениях в работе [5] для повышения чувствительности метода предложено модифицировать методику последующим восстановлением сульфатом железа КМК жёлтого цвета в комплекс синего цвета. Определение высокомолекулярных поликремниевых кислот по данной методике проводят после перевода полимеров в мономеры посредством длительной щелочной обработки.

В работах В.В. Матыченкова [12] показано, что разрушение полимерных форм кремниевых кислот можно также достигать ультразвуковой обработкой растворов, а авторами исследования [13] предложено воздействием ультразвука переводить коллоидные формы кремниевых кислот в растворимое состояние для предотвращения образования трудноудаляемых отложений в технологических водах теплоэлектростанций.

Кроме того, давно и успешно применяют [14, 15] фотохимические способы пробоподготовки природных объектов для устранения мешающего влияния органической матрицы и разрушения комплексов тяжёлых металлов, прежде всего с гуминовыми веществами, для их определения методом ИВ. Наиболее эффективной окислительной системой в условиях гомогенного катализа является система Фентона, которая заключается в инициировании гидроксил-радикалов путем добавления в раствор, содержащий пероксид водорода, катализаторов (катионы переходных металлов, таких как Fe^{2+} и Fe^{3+}). Скорость реакции Фентона значительно увеличивается под действием УФ излучения, такие системы получили название фото-Фентона. Так, авторам работы [16] удалось добиться снижения содержания 32 органических загрязнителей (лекарственные препараты, ингибиторы коррозии, пестициды) на 97–98 % на очистных сооружениях в г. Лозанна (Швейцария) в процессе фото-Фентона, проводимом при облучении ультрафиолетом (254 нм) практически в нейтральной среде. При этом ввиду содержания в сточных водах железа оказалось возможным исключить использование этого реагента.

В этой связи представляло интерес разработать эффективные способы пробоподготовки природ-

ных вод с применением УЗ- и УФ-полей для определения общего содержания растворимого кремния методом СФ с молибдатом аммония.

Экспериментальная часть

В работе использовали модельный раствор кремниевой кислоты, приготовленный растворением метасиликата натрия ($Na_2SiO_3 \cdot 1,5H_2O$) в дистиллированной воде. Концентрацию кремния в исходном растворе определяли методами СФ (Spekol 21 UV/VIS Spectrophotometer, Analytik Jena, Germany) в виде жёлтого КМК [17] и MS-ISP (NexION 300D, США). Для построения градуировочной характеристики использовали МСО раствора с массовой концентрацией кремния ($1,00 \pm 0,05$) мг/дм³ (СКТБ с ОП ФХИ НАНУ, Украина).

Гумусовые вещества получали посредством щелочной вытяжки из торфов Томской области по методике И.В. Тюрина в модификации В.В. Пономаревой и Т.А. Плотниковой [18]. Концентрацию ГВ в модельных растворах и природных водах устанавливали титриметрическим методом [19].

Для исследования взаимодействия кремниевой кислоты с ГВ готовили серию модельных растворов с различными значениями pH, которые варьировали в интервале 3–8 с помощью растворов 0,1 М HCl и 0,1 М NaOH по pH-метру (pH-метр/милливольтметр PP-15, Германия). Концентрацию кремния в модельных растворах варьировали в интервале 10–20 мг/дм³, а концентрацию ГК поддерживали постоянной и равной 20 мг/дм³ или 10 мг/дм³ соответственно. Кислотно-основной показатель (pH), концентрации кремния и ГВ в модельных растворах соответствовали усреднённому содержанию этих компонентов в природных водах Западной Сибири.

Концентрацию кремния в виде жёлтого комплекса определяли по методике: к раствору, содержащему 0,5–15 мг/л кремния, добавляли 1 мл 5 М раствора HCl, затем 2,0 мл 5 %-го раствора молибдата аммония $(NH_4)_6Mo_7O_{24}$, через 10 мин вносили 2,0 мл 10 %-го раствора $H_2C_2O_4$ для устранения мешающего влияния фосфора. Оптическую плотность раствора измеряли при длине волны 410 нм.

В качестве источника УФ излучения использовали ртутную лампу типа ДРЛ-250 с диапазоном 240–1100 нм и наиболее интенсивной линией при 254 нм. Ультрафиолетовое облучение исследуемых растворов, помещённых в кварцевый стакан ёмкостью 50 мл, осуществляли при их перемешивании на магнитной мешалке. Для фотохимического разрушения органических веществ и их комплексов с кремниевыми кислотами в растворе использовали систему фото-Фентона $Fe/UV/H_2O_2$, генерирующую супер-окислитель – гидроксил-радикалы [20]. Для этого в модельные растворы добавляли соли Fe (II) и H_2O_2 , а в природные воды – только H_2O_2 . Ультразвуковое воздействие осуществляли в условиях УЗ ванны Сапфир 6580 объёмом 2,8 л с мощностью генератора 100 Вт и рабочей частотой 35 кГц.

ИК-спектры ГВ и модельных растворов ($H_2SiO_3+ГВ$) после упаривания растворителя под красной лампой регистрировали на ИК Фурье спектрометре Nicolet 6700 (США).

Разработанные способы пробоподготовки были протестированы при анализе болотных и термальных вод Томской области, характеризующихся большим содержанием растворимых органических веществ (РОВ).

Обсуждение результатов

Ранее нами было показано [21], что полимеризация кремниевых кислот сильно возрастает в кислой среде (рН 1–4), поскольку, согласно [22], процесс полимеризации катализируют ионы водорода. Поэтому исследования по влиянию УЗ- и УФ-полей на разрушение поликремниевых кислот проводили на модельном растворе H_2SiO_3 с рН 3.

На рис. 1 представлено влияние времени УФ излучения на концентрацию кремния в модельном растворе, установленную по референтной методике до и после воздействия УФ светом.

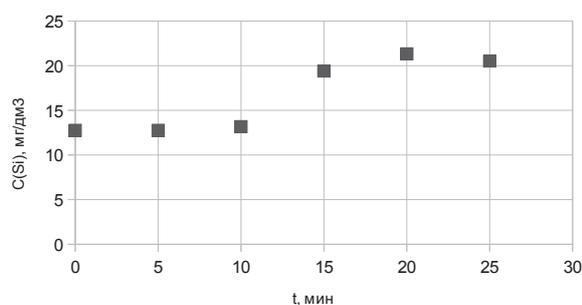


Рис. 1. Влияние времени УФ излучения на концентрацию кремния, находящегося в мономерной форме в модельном растворе H_2SiO_3 : $c(Si)=22$ мг/дм³; рН 3

Fig. 1. Effect of UV exposure time on concentration of monomeric silicon in H_2SiO_3 simulated solution; $c(Si)=22$ mg/dm³; рН 3

Видно, что УФ излучение влияет на формы существования кремния в растворе кремниевой кислоты. Так, в исходном растворе H_2SiO_3 в виде жёлтого КМК регистрируется около 60 % кремния, а при УФ воздействии в течение 20 минут найденная концентрация кремния практически совпадает с

введённой. Это указывает на разрушение полимерных форм, не детектируемых методом СФ.

Влияние времени и мощности УЗ-воздействия на формы существования кремния в модельном растворе кремниевой кислоты представлено на рис. 2.

Из рис. 2, а видно, что наибольшая концентрация кремния детектируется после УЗ воздействия в течение 10 мин при максимальной мощности (100 Вт). Изменение времени действия УЗ в интервале 2–20 мин при постоянной мощности УЗ ванны (100 Вт) показало (рис. 2, б), что оптимальным является 10 мин, поскольку увеличение времени УЗ действия до 20 мин не приводит к заметному изменению результатов. Таким образом, дальнейшие исследования влияния УЗ проводили при максимальной мощности УЗ ванны в течение 10 мин.

Таблица 1. Результаты определения концентрации кремния в модельных растворах кремниевой кислоты при различных значениях рН методом СФ в виде жёлтого КМК без пробоподготовки и после УФ- и УЗ-воздействия ($c_0(Si)=22$ мг/дм³; $n=3$; $P=0,95$)

Table 1. Results of determination of silicon concentration in silicic acid simulated solutions at different pH values by spectrophotometry in the form of SMYC without sample preparation and after UV and ultrasonic treatment ($c_0(Si)=22$ mg/dm³; $n=3$; $P=0,95$)

рН	c (Si) / mg/dm³			$(c_2 - c_1) / c_0$ (100 %)	$(c_3 - c) / c_0$ (100 %)	%, PSA* [15]
	c_1 , без пробоподготовки c_1 , without sample preparation	c_2 , после УФ, 20 мин c_2 , after 20 min UV irradiation	c_3 , после УЗ, 10 мин c_3 , after 10 min ultrasonic treatment			
3	12,8	21,3	16,4	38,6	16,4	37
5	12,4	19,6	16,0	32,7	16,4	23
7	11,2	16,5	14,1	24,1	13,2	22

*PSA – polysilicic acid (поликремниевая кислота).

В табл. 1 представлены результаты исследования влияния УФ- и УЗ-полей на формы существования кремния в модельном растворе кремниевой кислоты в зависимости от рН раствора. Концентрацию кремния в модельных растворах контролировали методом СФ в виде жёлтого КМК.

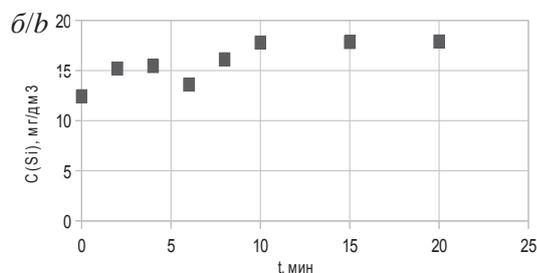
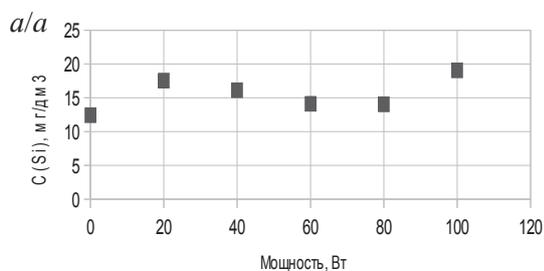


Рис. 2. Влияние мощности (а) и времени (б) воздействия ультразвуковых колебаний на концентрацию кремния, находящегося в мономерной форме в модельном растворе H_2SiO_3 : $c(Si) = 22$ мг/дм³; рН 3; $t_{в3} = 10$ мин (а); 100 Вт (б)

Fig. 2. Effect of (a) power and (b) exposure time of ultrasound on concentration of monomeric silicon in H_2SiO_3 simulated solution; $c(Si)=22$ mg/dm³; рН 3; $t_{в3} = 10$ min (а); 100 W (б)

Видно (табл. 1), что без пробоподготовки модельного раствора H_2SiO_3 во всём интервале pH методом СФ с молибдатом аммония не детектируется почти половина всего растворимого кремния. Относительное увеличение детектируемого кремния (в %) методом СФ после 20-минутного облучения раствора УФ-светом в целом коррелирует с влиянием pH на долю полимерных форм кремниевой кислоты, представленным нами в работе [23]. Из этого следует, что в условиях УФ излучения возможно разрушение поликремниевых кислот. Воздействие на растворы ультразвуковых колебаний в течение 10 минут, по-видимому, недостаточно для разрушения всех полимерных форм кремниевых кислот.

Природные воды, особенно болотного происхождения, содержат большое количество органических веществ (гуминовые и фульвокислоты), которые связывают кремний в комплексы и препятствуют его детектированию спектрофотометрическим методом. Поэтому для разрушения органических соединений кремния с ГВ исследовали наряду с воздействием УФ- и УЗ-полей активную фотохимическую систему Фентона ($Fe/UФ/H_2O_2$), генерирующую гидроксил-радикалы. Исследования проводили на модельных растворах ($H_2SiO_3+ГВ$) в интервале pH 3–8.

Взаимодействие ГВ с кремнием исследовали методом ИК-спектроскопии (рис. 3). В области плоскостных деформационных колебаний C–H групп бензольных колец ГВ ($995–1083\text{ см}^{-1}$) в ИК-спектрах модельных растворов ($H_2SiO_3+ГВ$) наблюдается некоторое смещение полосы до 1101 см^{-1} и увеличение её интенсивности, что может быть следствием образования связи Si–O–C. Причём после фотохимического воздействия в условиях системы фото-Фентона её интенсивность заметно уменьшается. Также обнаружено увеличение полос поглощения кетонов CH_3-CO (1370 см^{-1}), сопряжённых полиеновых альдегидов и кетонов (1660 см^{-1}), устойчивых ароматических C=C связей и деформационных колебаний CH_2 и CH_3 групп ($1400–1600\text{ см}^{-1}$).

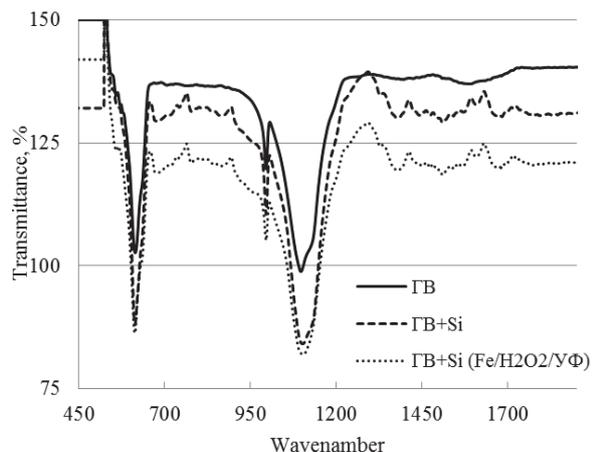


Рис. 3. ИК-спектры ГВ и модельных растворов ($H_2SiO_3+ГВ$) до и после фотохимического воздействия

Fig. 3. IR spectra of HS and model solutions (H_2SiO_3+HS) before and after photochemical exposure

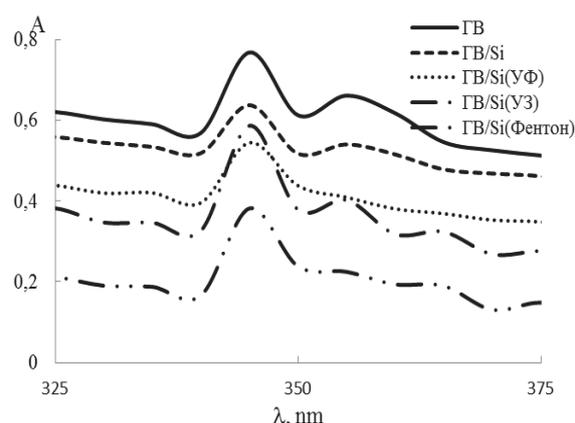


Рис. 4. Электронные спектры поглощения растворов ГВ и модельных растворов ($H_2SiO_3+ГВ$) до и после различных воздействий в УФ области

Fig. 4. Electronic absorption spectra of HS solutions and model solutions (H_2SiO_3+HS) before and after UV treatments

Сравнение электронных спектров поглощения (рис. 4) ГВ и модельных растворов ($H_2SiO_3+ГВ$) до и после различных воздействий в области ближнего УФ излучения (345, 355 нм) позволило обнаружить некоторые различия. Наблюдаемые полосы поглощения ГВ в данной области УФ спектра авторы [24] связывают с проявлением полисопряженных фрагментов и периферических частей структуры ГВ. Видно, что в условиях УФ излучения и системы Фентона происходит частичное разрушение структуры ГВ.

Таблица 2. Результаты определения концентрации кремния в модельных растворах ($H_2SiO_3+ГВ$) при различных значениях pH методом СФ без пробоподготовки и после воздействия различными полями: $c(Si)=10\text{ мг/дм}^3$; $c(ГВ)=10\text{ мг/дм}^3$; $\tau_{\text{возд.}} - 20\text{ мин}$ для УФ и 10 мин для УЗ

Table 2. Results of determination of silicon concentration in H_2SiO_3+HS simulated solutions at different pH values by spectrophotometry without sample preparation and after exposure to UV radiation and ultrasound; $c(Si)=10\text{ mg/dm}^3$; $c(HS)=10\text{ mg/dm}^3$; exposure time was 20 min for UV irradiation and 10 min for ultrasonic treatment

pH	$c(Si) / \text{mg/dm}^3$			
	Без пробоподготовки Without sample preparation	УЗ Ultrasound	УФ UV	$Fe/UФ/H_2O_2$ $Fe/UV/H_2O_2$
3	$7,87 \pm 0,22$	$8,2 \pm 0,6$	$8,3 \pm 0,7$	$10,4 \pm 0,3$
4	$9,24 \pm 0,16$	$9,8 \pm 0,8$	$9,8 \pm 0,5$	$11,3 \pm 1,5$
5	$9,55 \pm 0,20$	$9,7 \pm 0,9$	$8,9 \pm 0,8$	$10,8 \pm 1,1$
6	$4,60 \pm 0,14$	$5,4 \pm 0,4$	$5,8 \pm 0,2$	$9,2 \pm 0,6$
7	$8,2 \pm 0,4$	$7,9 \pm 0,4$	$7,0 \pm 0,9$	$10,0 \pm 0,8$
8	$6,26 \pm 0,14$	$8,6 \pm 0,8$	$8,7 \pm 0,6$	$9,8 \pm 0,9$

Из полученных данных видно (табл. 2), что только фотохимическая пробоподготовка приводит к определению всего кремния, содержащегося в модельных растворах практически во всём интервале кислотности. Полученные результаты в пределах погрешности согласуются с его введенным количеством. При этом результаты определе-

ния кремния в модельных растворах после воздействия УЗ и УФ-излучения практически совпадают с результатами анализа в отсутствие полей. По-видимому, эффективность фотохимической системы Фентона связана с высокой окислительной способностью гидроксил-радикалов, приводящей к деградации ГВ, что согласуется с литературными данными [25, 26] по применению системы Фентона для разрушения комплексов тяжёлых металлов с ГВ.

Исследуемые варианты пробоподготовки были применены к анализу природных вод различного происхождения: термальные воды (ТВ) с pH 7,6 и 7,8 и болотные воды (БВ) с pH 6,7 и 4,6, 4,7. Для создания системы Фентона вносили только пероксид водорода, поскольку железо входит в химический состав природных вод. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты определения концентрации кремния в природных водах различного происхождения после воздействия различных полей и системы Фентона: термальные воды – ТВ; болотные воды – БВ

Table 3. Results of determination of silicon concentration in natural waters of different origin after exposure to UV radiation, ultrasound and Fenton system; TW – thermal waters; BW – bog waters

Объект анализа Sample	pH	c (Si) / mg/dm ³			
		Без пробоподготовки Without sample preparation	УЗ Ultrasound	УФ UV	Fe/УФ/H ₂ O ₂ Fe/UV/H ₂ O ₂
БВ № 1	6,7	2,6±0,7	3,0±0,3	2,8±0,4	4,0±0,4
БВ № 2	4,6	8,5±0,3	8,2±0,5	8,4±0,8	8,6±0,4
БВ № 3	4,7	2,4±0,1	2,4±0,5	2,5±0,4	3,2±0,4
ТВ № 1	7,6	8,4±1,1	8,9±0,8	9,5±0,5	12,4±1,8
ТВ № 2	7,8	8,9±0,4	9,8±0,8	9,6±1,2	12,3±1,6

Результаты анализа термальных и болотных природных вод (табл. 3) подтверждают, что наиболее эффективным способом предварительной подготовки проб к анализу является система Фентона. Для сравнительной оценки полученных результатов исследуемые воды анализировали методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, позволяющим определять весь растворимый кремний. Сопоставление результатов анализа вод спектрофотометрическим методом в виде жёлтого КМК после фотохимической пробоподготовки с результатами определения кремния методом MS-ISP проводили с использованием норматива контроля (К) [27]. Норматив контроля рассчитывали по формуле:

$$K = (\Delta_1^2 + \Delta_2^2)^{1/2},$$

где Δ_1, Δ_2 – доверительные интервалы «средних».

Далее рассчитывали результат контрольной процедуры (K_k), который является разницей двух «средних» и сравнивали с К. Результаты сравнения «средних» двух методов и проверки правильности предлагаемого способа пробоподготовки приведены в табл. 4.

Таблица 4. Сравнение результатов определения кремния (с (Si), мг/дм³) в природных водах методом СФ после фотохимической пробоподготовки и методом MS-ISP

Table 4. Comparison of results for determination of silicon (c (Si) in mg/dm³ units) in natural waters obtained by spectrophotometry after photochemical sample preparation and by ICP-MS

Объект анализа Sample	Fe/UV/H ₂ O ₂ , spectrophotometry	ICP-MS	K _k	K
БВ № 1	4,0±0,4	3,4±0,5	0,6	0,6
БВ № 2	8,6±0,4	7,5±1,1	1,1	1,2
БВ № 3	3,2±0,4	2,7±0,4	0,5	0,6
ТВ № 1	12,4±1,8	14,3±2,1	1,9	2,8
ТВ № 2	12,3±1,6	13,9±2,1	1,6	2,6
ТВ № 3	32,6±1,9	36±5	3,4	5,7
ТВ № 4	37,5±3,4	42±6	4,5	7,2

Из полученных данных видно, что результат контрольной процедуры не превышает норматива контроля. Это позволяет сделать вывод о том, что «средние» двух независимых методов различаются незначительно, то есть результаты анализа методом СФ с предварительной фотохимической пробоподготовкой правильны.

Таким образом, система Фентона может успешно применяться для подготовки природных вод к анализу на содержание кремния методом СФ по референтной методике.

Выводы

1. Предложен современный способ пробоподготовки природных вод на содержание растворимого кремния методом СФ в виде жёлтого КМК по референтной методике, который заключается в фотохимическом разрушении соединений кремния с гуминовыми веществами и поликремниевых кислот в условиях системы Фентона.
2. Правильность разработанного способа пробоподготовки доказана сравнением результатов анализа природных вод различного происхождения двумя независимыми методами (СФ и MS-ISP) с использованием норматива контроля (К).
3. Показано, что в условиях УФ излучения происходит разрушение поликремниевых кислот. Это может быть использовано для количественной оценки различных форм кремниевых кислот методом СФ в виде жёлтого КМК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Determination of carbon, phosphorus, nitrogen and silicon species in waters / K. Robards, I.D. McKelvie, R.L. Benson, P.J. Worsfold, N.J. Blundell, H. Casey // *Analytica Chimica Acta*. – 1994. – V. 287. – P. 147–190.
2. Weres O., Yee A., Tsao L. Kinetics of silica polymerization // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 1981. – V. 84. – № 2. – P. 379–402.
3. Ma I.F., Takahashi E. Effect of silicon on growth and phosphorus uptake of rice // *Plant Soil*. – 1990. – V. 126. – № 1. – P. 115–119.
4. Banerjee A.K., Laya Mimo M.S., Vera Vegas W.J. Silica gel in organic synthesis // *Russian Chemical Reviews*. – 2001. – 70. – № 11. – P. 971–990.
5. Подвижные кремниевые соединения в системе почва – растение и методы их определения / Матыченков и др. // *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение*. – 2016. – № 3. – С. 39–48.
6. Dietzel M. Dissolution of silicates and the stability of polysilicic acid // *Geochim. Cosmochim. Acta*. – 2000. – V. 64. – № 19. – P. 275–281.
7. Dupius T., Tamby P., Dupuis J. Etude experimental de l'action des acides fulviques sur les gels silies-magnésies et les silicates magnésiens. // *Bull. Assoc. Fr. Etude sol.* – 1982. – V. 4. – P. 241–252.
8. Pokrovski G.S., Schott J. Experimental study of the complexation of silicon and germanium with aqueous organic species: implications for germanium and silicon transport and Ge/Si ratio in natural waters // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1998. – V. 62. – № 22. – P. 3413–3428.
9. Кремний и гуминовые кислоты: моделирование взаимодействий в почве / Е.Н. Офицеров, Г.К. Рябов, Ю.А. Убаскина, А.Б. Климовский, Е.Г. Фетюхина // *Известия Самарского Научного Центра Российской Академии Наук*. – 2011. – Т. 13. – № 4. – С. 550–557.
10. Фотиев В.А. К природе водного гумуса // *Доклады Академии Наук СССР*. – 1971. – Т. 199. – № 1–2. – С. 198–201.
11. ПНД Ф 14.1:2:4.215–06. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации кремниевых кислот (в пересчете на кремний) в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом в виде желтой кремнемолибденовой гетерополикислоты. – М.: Федеральное Бюджетное Учреждение Федеральный Центр анализа и Оценки техногенного воздействия, 2011. – 22 с.
12. Матыченков В.В., Амосова Я.М., Бочарникова Е.А. Метод определения доступного для растений кремния в почвах. *Агрохимия*. – 1997. – № 1. – С. 76–84.
13. Ультразвуковые методы воздействия на технологические процессы / под ред. Н.Н. Хавского. – М.: Металлургия, 1981. – 141 с.
14. Фотохимическая деструкция ПАВ при определении тяжелых металлов в водах методом инверсионной вольтамперометрии / Л.А. Хустенко, Э.А. Захарова, Е.Е. Фоминцева, Ю.А. Иванов // *Заводская лаборатория*. – 1991. – Т. 57. – № 8. – С. 1–4.
15. Zhelovickaja A.V., Dresvjannikov A.V., Chudakova O.G. Use of perspective oxidative processes for purification of sewage that contain pharmaceutical compounds (review) // *Vestnik Kazanskogo tehnol. un-ta – Herald of Kazan Technological University*. – 2015. – V. 18. – № 20. – P. 73–79.
16. Degradation of 32 emergent contaminants by UV and neutral photo-Fenton in domestic wastewater effluent previously treated by activated sludge / N. De la Cruz, J. Gimenez, S. Esplugas, D. Grandjean, L.F. de Alencastro, C. Pulgarin // *Water Research*. – 2012. – № 46. – P. 1947–1957.
17. Strickland J.D.H. The preparation and properties of silicomolybdenic acid // *Journal of the American Chemical Society*. – 1952. – V. 74. – № 4. – P. 868–871.
18. Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Гумус и почвообразование (методы и результаты изучения). – Л.: Найка, 1980. – 221 с.
19. Резников А.А., Муликовская Е.П., Соколов И.Ю. Анализ природных вод. – М.: Недра, 1970. – 487 с.
20. Protocatechuic Acid Promoted Alachlor Degradation in Fe(III)/H₂O₂ Fenton System / Y. Qin, F. Song, Z. Ai, P. Zhang, L. Zhang // *Environ. Sci. Technol.* – 2015. – V. 49. – № 13. – P. 7948–7956.
21. Исследование форм нахождения кремния в природных водах с высоким содержанием растворенных органических веществ / М.Г. Камбалина, Л.Н. Скворцова, И.С. Мазурова, Н.В. Гусева, А.А. Бакибаев // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014. – Т. 325. – № 3. – С. 64–70.
22. Chan SH. A review on solubility and polymerization of silica // *Geothermics*. – 1989. – V. 18. – № 1–2. – P. 49–56.
23. К вопросу о методах определения растворимых соединений кремния в воде и методах ее обескремнивания / М.Г. Камбалина, Л.Н. Скворцова, И.С. Мазурова, Н.В. Гусева // *Известия Томского политехнического университета*. – 2013. – Т. 323. – № 3. – С. 18–22.
24. Изменение свойств гуминовых веществ под воздействием УФ-света / И.А. Савченко, И.Н. Корнеева, Г.В. Плаксин, Е.А. Лукша, Д.С. Гончаров // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 10. – Ч. 12. – С. 2705–2709.
25. Вода техногенная: проблемы, технологии, ресурсная ценность / З.М. Шулина, В.В. Багров, А.В. Десятов, А.А. Зубков и др. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 401 с.
26. Harlamova T.A., Alaferdov A.F., Maslova O.V. Influence of electrochemical impact on destruction of organic compounds // *Chemical problems*. – 2016. – № 3 (14). – P. 244–270.
27. RMG 76–2014. State system for ensuring the uniformity of measurements. Internal control of quantitative chemical analysis result's accuracy. Official Edition. Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (ISC). – М.: Standartinform, 2015. – 116 p.

Поступила 04.05.2017 г.

Информация об авторах

Бекбулатова И.А., студентка магистратуры Химического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

Скворцова Л.Н., кандидат химических наук, доцент кафедры аналитической химии Химического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

Щёголева И.С., инженер ПНИЛ гидрогеохимии НОЦ «Вода» кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 543.3:[546.28:+543.422]

DETERMINATION OF SILICON IN NATURAL WATERS BY SPECTROPHOTOMETRY USING MODERN METHODS OF SAMPLE PREPARATION

Indira A. Bekbulatova¹,
bekbulatova_indira@mail.ru

Lidia N. Skvortsova¹,
lnskvorcova@inbox.ru

Irina S. Shchegoleva²,
irinamazurova@inbox.ru

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

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

The main aim of the study is to develop modern methods of preparing natural water samples using ultrasound, ultraviolet radiation and photocatalytic systems for destruction of polysilicic acids and silicon complexes with humic substances to determine soluble silicon by spectrophotometric method.

The methods used in the study: spectrophotometry, IR spectroscopy, inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS).

The results. The use of ultrasound, ultraviolet radiation and Fenton photocatalytic systems the authors have studied destruction of polysilicic acids and silicon complexes with humic substances to develop modern and effective methods of preparing natural water samples in spectrophotometric determination of soluble silicon in the form of silicon molybdenum yellow complex by reference procedure. It was shown that the photochemical Fenton system is the most effective for sample preparation. The developed procedure of sample preparation was applied for analysis of thermal and bog waters on dissolved silicon by spectrophotometry. The correctness of the method was confirmed by comparison of the results obtained by spectrophotometry and ICP-MS using the inspection standard. Under ultraviolet radiation, polysilicic acids are destroyed that can be used for quantification of different forms of silicic acids by spectrophotometric method. It was found that ultrasonic pre-treatment is not suitable for spectrophotometric control of soluble forms of silicon.

Key words:

Silicon, polymeric silicic acids, colloidal silicon, sample preparation, UV radiation, ultrasound, humic substances, bog waters, molecular absorption spectrophotometric method.

REFERENCES

- Robards K., McKelvie I.D., Benson R.L., Worsfold P.J., Blundell N.J., Casey H. Determination of carbon, phosphorus, nitrogen and silicon species in waters. *Analytica Chimica Acta*, 1994, vol. 287, pp. 147–190.
- Weres O., Yee A., Tsao L. Kinetics of silica polymerization. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1981, vol. 84, no. 2, pp. 379–402.
- Ma I.F., Takahashi E. Effect of silicon on growth and phosphorus uptake of rice. *Plant Soil*, 1990, vol. 126, no. 1, pp. 115–119.
- Banerjee A.K., Laya Mimo M.S., Vera Vegas W.J. Silica gel in organic synthesis. *Russian Chemical Reviews*, 2001, vol. 70, no. 11, pp. 971–990.
- Matychenkov I.V., Khomiakov D.M., Pakhnenko E.P., Bocharnikova E.A., Matychenkov V.V. Podvizhnye kremnievye soedineniya v sisteme pochva–rastenie i metody ikh opredeleniya [Mobile Si-rich compounds in the soil-plant system and methods for their determination]. *Moscow University Soil Science Bulletin*, 2016, vol. 71, no. 3, pp. 120–128.
- Dietzel M. Dissolution of silicates and the stability of polysilicic acid. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2000, vol. 64, no. 19, pp. 275–281.
- Dupius T., Tamby P., Dupuis J. Etude experimental de l'action des acides fulviques sur les gels silies-magnésies et les silicates magnésiens. *Bulletin Assoc. Fr. Etude sol*, 1982, vol. 4, pp. 241–252.
- Pokrovski G.S., Schott J. Experimental study of the complexation of silicon and germanium with aqueous organic species: implications for germanium and silicon transport and Ge/Si ratio in natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, vol. 62, no. 22, pp. 3413–3428.
- Ofitserov E.N., Ryabov G.K., Ubaskina Yu.A., Klimovsky A.B., Fetyukhina E.G. Kremniy i guminovye kisloty: modelirovanie vzaimodeystviya v pochve [Silicon and humic acids: modelling of interactions in soil]. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2011, vol. 13, no. 4, pp. 550–557.
- Potiev V.A. K prirode vodnogo gumusa [On the issue of the nature of humus aqueous solution]. *Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 1971, vol. 199, no. 1–2, pp. 198–201.
- PND F 14.1:2:4.215–06 (2011). *Kolichestvenny khimichesky analiz/metodika izmereny massovoy kontsentratsii kremnekisloty (v pereschete na kremny) v pityevykh, poverkhnostnykh i stochnykh vodakh fotometricheskim metodom v vide zheltoy kremnilebdenovoy heteropolikisloty* [Federal Environmental Regulatory Document PND F 14.1:2:4.215–06 (2011) Quantitative chemical analysis of water. Procedure for measuring the weight concentration of silicic acid (expressed as silicon) in drinking, surface and waste waters by photometric method in the form of silicon molybdenum yellow heteropolyacid]. Moscow, Federal analysis center of valuation of human impact, 2011, 22 p.
- Matychenkov V.V., Ammosova Ya.M., Bocharnikova E.A. Metod opredeleniya dostupnogo dlya rastenii kremniya v pochvakh [The method for determining silica available for plant in soil]. *Agrokhi-miya*, 1997, no. 1, pp. 76–84.

13. *Ultrazvukovye metody vozdeistviya na tekhnologicheskie protsessy* [Ultrasonic methods of affecting the technological processes]. Ed. by N.N. Khavsky. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 141 p.
14. Khustenko L.A., Zakharova E.A., Fomintseva E.E., Ivanov Yu.A. Fotokhimicheskaya destruktziya PAV pri opredelenii tyazhelykh metallov metodom inversionnoy voltamperometrii [Photochemical destruction of surfactants for determining heavy metals in water by stripping voltammetry]. *Industrial laboratory. Materials diagnostics*, 1991, vol. 57, no. 8, pp. 1–4.
15. Zhelovickaja A.V., Dresvjannikov A.V., Chudakova O.G. Use of perspective oxidative processes for purification of sewage that contain pharmaceutical compounds (review). *Herald of Kazan Technological University*, 2015, vol. 18, no. 20, pp. 73–79.
16. De la Cruz N., Gimenez J., Esplugas S., Grandjean D., De Alencastro L.F., Pulgarin C. Degradation of 32 emergent contaminants by UV and neutral photo-Fenton in domestic wastewater effluent previously treated by activated sludge. *Water Research*, 2012, no. 46, pp. 1947–1957.
17. Strickland J.D.H. The preparation and properties of silicomolybdenic acid. *Journal of the American Chemical Society*, 1952, vol. 74, no. 4, pp. 868–871.
18. Ponomareva V.V., Plotnikova T.A. *Gumus i pochvoobrazovanie (metody i rezultaty izucheniya)* [Humus and soil formation (methods and results)]. Leningrad, Nauka Publ., 1980. 221 p.
19. Reznikov A.A., Mulikovskaya E.P., Sokolov I.Yu. *Metody analiza prirodnykh vod* [Natural water analysis]. Moscow, Nedra Publ., 1970. 487 p.
20. Qin Y., Song F., Ai Z., Zhang P., Zhang L. Protocatechuic Acid Promoted Alachlor Degradation in Fe (III)/H₂O₂ Fenton System. *Environ. Sci. Technol.*, 2015, vol. 49, no. 13, pp. 7948–7956.
21. Kambalina M.G., Skvortsova L.N., Mazurova I.S., Guseva N.V., Bakibaev A.A. Research of the silicon aqueous forms in organic-rich natural water. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 3. pp. 64–70. In Rus.
22. Chan SH. A review on solubility and polymerization of silica. *Geothermics*, 1989, vol. 18, no. 1–2, pp. 49–56.
23. Kambalina M.G., Skvortsova L.N., Mazurova I.S., Guseva N.V. On the issue of methods for determining silicon soluble compounds in water and the techniques of its desilicisation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 323, no. 3, pp. 18–22. In Rus.
24. Savchenko I.A., Korneeva I.N., Plaksin G.V., Luksha E.A., Goncharov D.S. Izmenenie svoystv guminovykh veshchestv pod vozdeystviem UF-sveta [Change in the properties of humic substances under the influence of UV light]. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2013, no. 10, Ch. 12, pp. 2705–2709.
25. Shulenina V.V., Bagrov V.V., Desyatov A.V. *Voda tekhnogennaya: problemy, tekhnologii, resursnaya tsennost* [Technogenic water: problems, technologies and value]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2015. 401 p.
26. Harlamova T.A., Alaferdov A.F., Maslova O.V. Influence of electrochemical impact on destruction of organic compounds. *Chemical problems*, 2016, no. 3 (14), pp. 244–270.
27. *RMG 76–2014. State system for ensuring the uniformity of measurements. Internal control of quantitative chemical analysis result's accuracy. Official Edition. Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (ISC)*. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 116 p.

Received: 4 May 2017.

Information about the authors

Indira A. Bekbulatova, student, National Research Tomsk State University.

Lidia N. Skvortsova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk State University.

Irina S. Shechegoleva, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 622.276.63

УСТРАНЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРИЗАБОЙНУЮ ЗОНУ СКВАЖИН

Мухаметшин Вячеслав Вячеславович,

vsh@of.ugntu.ru

Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, Республика Башкортостан, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

Актуальность. Анализ опыта проведения воздействий на призабойную зону пласта показывает, что успешность операций по интенсификации добычи нефти в среднем составляет около 50 %. Наряду с этим имеют место моменты, не позволяющие однозначно трактовать успешность и эффективность ввиду использования различных критериев оценки. Эти критерии зачастую «конфликтуют» друг с другом, создают неопределенность трактования результатов и, как следствие, затрудняют решение задачи повышения эффективности воздействий на призабойную зону пласта.

Цель. Устранение неопределенностей различного вида при обосновании и выборе скважин и технологий с учетом геолого-технологических особенностей разработки объектов.

Методы. С использованием канонического дискриминантного анализа обобщен опыт проведения различных видов интенсификации добычи нефти на залежах с трудноизвлекаемыми запасами в терригенных коллекторах.

Результаты. Получен аппарат, основанный на использовании уравнений канонических дискриминантных функций, представлении групп скважин по видам обработок в осях этих функций и выделении областей их приуроченности, позволяющий устранить ряд неопределенностей при решении задач, направленных на повышение эффективности диагностирования и воздействия на призабойную зону скважин.

Выводы. Результаты позволяют в условиях анализируемых и аналогичных им объектов:

- по значениям геолого-технологических параметров устанавливать, к какой группе (по успешности) относится скважина;
- устранить влияние «псевдоэффекта» при оценке результатов воздействия и путем изменения технологических параметров воздействия переводить скважины из зон «псевдоэффекта» в зоны с однозначно положительным эффектом;
- оперативно принимать управляющее решение и использовать опыт обработок той группы, к которой относится конкретная скважина;
- проводить адаптацию технологии воздействия к конкретным геологическим условиям и адресное воздействие на призабойную зону пласта с учетом фактора времени (стадийности разработки).

Ключевые слова:

«Псевдоэффект», фактор времени, воздействие на призабойную зону, адаптация технологии, адресное воздействие.

Актуальность

Важной задачей при проведении воздействия на призабойную зону пласта (ПЗП) с целью интенсификации добычи нефти и снижения обводненности продукции является устранение различного рода неопределенностей при обосновании и выборе скважин и технологий с учетом геолого-технологических особенностей разработки объектов [1–6]. Именно неопределенности трактования эффекта, выраженного через различные показатели, являются причиной, не позволяющей принимать обоснованные управленческие решения, что сказывается на эффективности проводимых мероприятий.

Цель

Одним из направлений решения этой задачи является всесторонний анализ результатов воздействия и создание аппарата, позволяющего:

- оценивать не только дифференцированно эффективность воздействия по каким-либо критериям, но и в комплексе;
- проводить сравнительную оценку различных методов воздействия при различных значениях технологических параметров воздействия;
- устранять неопределенности при оценке эффекта, одной из разновидностей которого является «псевдоэффект» – когда различные пока-

затели эффективности формируют противоречия при проведении оценок. Например, наряду с ростом дебита происходит увеличение обводненности, или наоборот, наряду с увеличением коэффициента продуктивности наблюдается рост обводненности и снижение дебита нефти;

- определять направление влияния и значения технологических параметров воздействия для устранения «псевдоэффекта» в пределах изученных интервалов значений параметров;
- учитывать стадийность разработки месторождения, т. е. фактор времени [7–12].

Методы

Решению отдельных вопросов этой задачи посвящены работы [13–20], в которых приводятся результаты обобщения опыта проведения воздействий в специфических условиях месторождений и при иных, отличных от рассматриваемых, что делает проблематичным перенос этого опыта в иные условия. Кроме того, круг решаемых вопросов имеет иной набор рассматриваемых проблем и способов решений, что имеет свои плюсы и минусы.

Для устранения неопределенностей с целью получения возможности более широкого использования для воздействия на ПЗП хорошо зарекомендовавших себя кислотных составов, предотвращаю-

ших эмульсионное образование (КСПЭО) [21, 22] с добавками модификаторов (Алдинол-20) [23, 24] в условиях низкопроницаемых терригенных залежей с трудноизвлекаемыми запасами, было проведено обобщение опыта проведения воздействия и получены определенные результаты.

Все скважины по обоим методам по успешности воздействия были разделены на 4 группы:

- 1) скважины, в которых получен прирост дебита нефти и снижение обводненности;
- 2) скважины, в которых получен прирост дебита нефти и увеличение обводненности;
- 3) скважины, в которых получено снижение дебита нефти и обводненности;
- 4) скважины, в которых получено снижение дебита нефти и увеличение обводненности.

С помощью дискриминантного анализа [25, 26] было проведено обобщение результатов с использованием данных геолого-физических свойств пластов в скважинах, технологических параметров работы скважин и залежей, технологических параметров воздействия. Выбор метода обусловлен необходимостью [27, 28]:

- четкого разделения скважин на группы;
- получения возможности сжатия многомерного пространства (до двухмерного) без существенной потери информации о скважинах;
- установления центров группирования и выделения наиболее «ярких» представителей групп;
- проверки правильности проведенного разделения скважин;
- удобного использования полученных результатов в пределах идентификации и поиска скважин-аналогов.

Геолого-физические свойства пласта в скважине отражались с помощью следующих параметров: общая ($H_{общ}$, м), эффективная ($H_{эф}$, м), эффективная нефтенасыщенная ($H_{эфн}$, м) толщина пласта, песчаность ($K_{п}$), расчлененность ($K_{р}$), пористость открытая (m), нефтенасыщенность ($K_{н}$); коэффициенты проницаемости ($K_{дрон}$, 10^{-3} мкм²), собственной поляризации ($\alpha_{сп}$); отсчеты в пласте по БК ($M_{БК}$, Ом·м), амплитуды ПС ($A_{ПС}$, Ом·м), по ГЗ1 ($A_{0,4M0,1N}$) ($A_{0,4}$, Ом·м), по ГЗ2 ($A_{1,0,4M0,1N}$) ($A_{1,0}$, Ом·м), по ГЗ3 ($A_{2,0,4M0,5N}$) ($A_{2,0}$, Ом·м), по ГЗ4 ($A_{4,0,4M0,5N}$) ($A_{4,0}$, Ом·м), по ПЗ ($A_{0,5M6,0N}$) ($A_{0,5}$, Ом·м), гамма-каротажа (γ , мкр/ч), большого зонда ННКт ($\beta'_{ннк\tau}$), малого зонда ННКт ($\beta''_{ннк\tau}$), индукционного зонда ($\beta_{из}$, сим); удельное электрическое сопротивление зонда по ИК ($\rho_{ИК}$, Ом·м), по БК ($\rho_{БК}$, Ом·м), по комплексу зондов электрокаротажа ($A_{КОМП}$, Ом·м), зоны проникновения по комплексу зондов электрокаротажа ($A_{КОМП}^{зп}$, Ом·м), отношение диаметра зоны проникновения фильтра проницаемой жидкости к диаметру скважины ($d_{зп}/d_c$).

Использовались значения параметров как в целом по разрезу (X), так и по перфорированной его части (\bar{X}).

Технологические параметры работы скважин и залежей характеризовали параметры: время

(t , мес), максимальный дебит нефти ($Q_{н\max}$, т/мес) с начала эксплуатации скважины до момента проведения воздействия; дебит нефти ($Q_{н}$, т/мес), обводненность (f_1 , %), накопленная добыча нефти ($Q_{нак}$, т) на момент проведения воздействия; начальный дебит нефти ($Q_{нач}$, т/мес), кратность проведения воздействия (N) [29].

Среди параметров, отражающих технологию воздействия на основе Алдинола-20, использовались: расход Алдинола-20 (ALD, т), 22 %-ной соляной кислоты (HCl, т); объем закачанного раствора (V , м³), а также различные удельные показатели; на основе модификаторов (КСПЭО) дополнительно использовался расход модификаторов и борфтористоводородной кислоты (МК-В (К), т) [16].

Интервалы изменения значений основных геолого-технологических параметров по скважинам представлены в табл. 1.

Таблица 1. Интервалы изменения значений основных геолого-технологических параметров объектов исследования

Table 1. Intervals of changes of values of the main geological and technological parameters of the research objects

Параметр, ед. изм. Parameters, units	Вид воздействия/Effect			
	Алдинол-20/Aldinol-20		КСПЭО/KSPEO	
	X	\bar{X}	X	\bar{X}
$H_{общ}$, м	4,2–28,6	4,0–21,0	3,6–35,4	3,0–21,0
$H_{эф}$, м	2,8–17,6	2,2–12,8	2,2–27,0	1,6–13,2
$H_{эфн}$, м	2,8–17,6	2,2–12,4	1,6–15,6	1,6–12,4
$K_{п}$	0,41–1,0	0,17–1,0	0,26–1,0	0,2–1,0
$K_{р}$	1–11	1–11	1–5	1–5
m	0,13–0,20	0,13–0,21	0,14–0,20	0,15–0,21
$K_{дрон}$, 10^{-3} мкм ²	1,0–130,0	1,0–150,0	2,0–86,0	2,5–88,0
$K_{н}$	0,47–0,76	0,49–0,76	0,44–0,76	0,44–0,76
$\alpha_{сп}$	0,55–0,97	0,61–0,95	0,50–0,98	0,62–1,0
$M_{БК}$, Ом·м	2,5–20,1	2,5–20,1	5,3–17,6	6,6–17,6
$A_{ПС}$, Ом·м	25–96	48–91	32–91	47–91
$\rho_{ИК}$, Ом·м	5,1–11,3	5,3–11,3	4,5–10,9	4,4–10,9
$\rho_{БК}$, Ом·м	2,5–17,8	2,5–19,4	5,2–17,6	6,6–17,6
$A_{2,0}$, Ом·м	8,0–25,1	8,7–15,6	7,3–25,2	7,3–28,2
$A_{КОМП}$, Ом·м	4,8–10,5	4,8–11,3	4,1–10,8	4,2–11,8
$d_{зп}/d_c$	2,0–4,3	2,0–4,0	2,0–3,3	2,0–2,6
γ , мкр/ч	5,5–44,8	5,6–49,6	2,0–53,2	2,5–53,2
$\beta_{из}$, сим	71,0–157,0	71,0–155,0	6,8–184,0	80,0–180,0
$Q_{нак}$, т	160–82976		212–52261	
t , мес	2–241		2–247	
$Q_{н\max}$, т/мес	147–3065		115–1662	
$Q_{нач}$, т/мес	3–1141		23–1444	
f_1 , %	6–84		4–75	
$Q_{н}$, т/мес	23–769		26–639	
N	1–3		1–3	
ALD, т	1,6–6,8		–	
V , м ³	4–12		3–12	
$V/H_{эфн}$, м ³ /м	0,48–3,06		0,43–3,75	
МК-В (К), т	–		0,29–1,15	

Таблица 2. Уравнения для расчета значений канонических дискриминантных функций при использовании кислотных составов на основе композиции КСПЭО

Table 2. Equations for calculating the values of canonical discriminant functions when using the acid compositions based on the emulsification preventing composition (KSPEO)

Вариант 1	
$Y_1 =$	$ \begin{aligned} & -21,397 + 0,617H_{\text{общ}} - 0,956H_{\text{э}} + 0,075H_{\text{эн}} + 8,131K_{\text{п}} - 0,137K_{\text{р}} + 178,436m - \\ & - 0,189K_{\text{проп}} + 78,42K_{\text{н}} - 15,899\alpha_{\text{сп}} + 0,252M_{\text{БК}} + 0,104A_{\text{пс}} - 3,479\rho_{\text{ИК}} - \\ & - 1,634\rho_{\text{БК}} + 0,675A_{0,4} + 0,14A_{1,0} - 1,148A_{2,0} + 1,158A_{4,0} + 0,473A_{0,5} + \\ & + 3,293A_{\text{комп}} - 0,515d_{\text{зп}}/d_{\text{с}} + 0,105A_{\text{комп}}^{\text{зп}} + 0,166\gamma + 5,648\beta'_{\text{ннкТ}} - \\ & - 8,31\beta''_{\text{ннкТ}} - 0,033\beta_{\text{из}} - 0,289\bar{H}_{\text{общ}} + 0,645\bar{H}_{\text{э}} - 0,222\bar{H}_{\text{эн}} - 2,57\bar{K}_{\text{п}} - \\ & - 160,403\bar{m} + 0,158\bar{K}_{\text{проп}} - 63,006\bar{K}_{\text{н}} + 6,816\bar{\alpha}_{\text{сп}} + 0,243\bar{M}_{\text{БК}} - 0,041\bar{A}_{\text{пс}} + \\ & + 3,102\bar{\rho}_{\text{ИК}} + 0,119\bar{\rho}_{\text{БК}} - 0,677\bar{A}_{0,4} + 0,108\bar{A}_{1,0} + 0,845\bar{A}_{2,0} - 0,916\bar{A}_{4,0} - \\ & - 0,416\bar{A}_{0,5} - 1,824\bar{A}_{\text{комп}} + 0,06\bar{d}_{\text{зп}}/\bar{d}_{\text{с}} - 0,015\bar{A}_{\text{комп}}^{\text{зп}} - 0,211\bar{\gamma} - 6,304\beta'_{\text{ннкТ}} + \\ & + 11,169\beta''_{\text{ннкТ}} + 0,077\beta_{\text{из}} + 0,006\bar{t} + 0,002\bar{Q}_{\text{нач}} - 0,152N \end{aligned} $
$Y_2 =$	$ \begin{aligned} & -39,484 + 0,633H_{\text{общ}} - 0,995H_{\text{э}} + 0,2H_{\text{эн}} - 1,226K_{\text{п}} - 0,066K_{\text{р}} - 59,429m + \\ & + 0,073K_{\text{проп}} + 15,526K_{\text{н}} + 8,93\alpha_{\text{сп}} + 0,557M_{\text{БК}} + 0,082A_{\text{пс}} - 0,757\rho_{\text{ИК}} + \\ & + 0,695\rho_{\text{БК}} - 1,05A_{0,4} + 0,251A_{1,0} - 0,341A_{2,0} + 0,423A_{4,0} - 2,117A_{0,5} + \\ & + 0,868A_{\text{комп}} + 1,216d_{\text{зп}}/d_{\text{с}} - 0,035A_{\text{комп}}^{\text{зп}} + 0,429\gamma + 7,215\beta'_{\text{ннкТ}} - \\ & - 25,015\beta''_{\text{ннкТ}} - 0,043\beta_{\text{из}} + 0,228\bar{H}_{\text{общ}} - 0,011\bar{H}_{\text{э}} + 0,041\bar{H}_{\text{эн}} + 3,277\bar{K}_{\text{п}} + \\ & + 151,81\bar{m} - 0,103\bar{K}_{\text{проп}} - 36,118\bar{K}_{\text{н}} + 0,238\bar{\alpha}_{\text{сп}} - 0,909\bar{M}_{\text{БК}} - 0,037\bar{A}_{\text{пс}} + \\ & + 2,62\bar{\rho}_{\text{ИК}} - 0,526\bar{\rho}_{\text{БК}} + 0,964\bar{A}_{0,4} - 0,729\bar{A}_{1,0} + 0,381\bar{A}_{2,0} - 0,683\bar{A}_{4,0} + \\ & + 1,94\bar{A}_{0,5} - 0,205\bar{A}_{\text{комп}} + 0,585\bar{d}_{\text{зп}}/\bar{d}_{\text{с}} + 0,21\bar{A}_{\text{комп}}^{\text{зп}} - 0,366\bar{\gamma} - 6,82\beta'_{\text{ннкТ}} + \\ & + 24,153\beta''_{\text{ннкТ}} + 0,122\beta_{\text{из}} + 0,001\bar{Q}_{\text{нач}} + 1,182N \end{aligned} $
Вариант 2	
$Y_1 =$	$ \begin{aligned} & -6051,256 + 54,305H_{\text{общ}} - 49,879H_{\text{э}} + 22,474H_{\text{эн}} + 142,807K_{\text{п}} - 36,543K_{\text{р}} + \\ & + 1306,528m - 5,493K_{\text{проп}} + 5679,09K_{\text{н}} + 455,783\alpha_{\text{сп}} + 135,538M_{\text{БК}} - \\ & - 4,627A_{\text{пс}} - 260,146\rho_{\text{ИК}} + 48,689\rho_{\text{БК}} + 71,894A_{0,4} - 46,604A_{1,0} - \\ & - 26,037A_{2,0} + 95,387A_{4,0} - 103,512A_{0,5} + 264,695A_{\text{комп}} + 2601,572d_{\text{зп}}/d_{\text{с}} + \\ & + 56,431A_{\text{комп}}^{\text{зп}} - 23,428\gamma - 178,595\beta'_{\text{ннкТ}} - 1208,119\beta''_{\text{ннкТ}} + 7,817\beta_{\text{из}} + \\ & + 34,405\bar{H}_{\text{общ}} - 51,376\bar{H}_{\text{э}} + 44,788\bar{H}_{\text{эн}} + 270,957\bar{K}_{\text{п}} + 23181,309\bar{m} - \\ & - 6,038\bar{K}_{\text{проп}} - 7295,47\bar{K}_{\text{н}} + 628,8\bar{\alpha}_{\text{сп}} - 167,457\bar{M}_{\text{БК}} + 0,169\bar{A}_{\text{пс}} + \\ & + 566,878\bar{\rho}_{\text{ИК}} - 18,13\bar{\rho}_{\text{БК}} - 2,307\bar{A}_{0,4} - 23,435\bar{A}_{1,0} + 29,056\bar{A}_{2,0} - \\ & - 113,493\bar{A}_{4,0} + 90,2\bar{A}_{0,5} - 20,706\bar{A}_{\text{комп}} - 2410,971\bar{d}_{\text{зп}}/\bar{d}_{\text{с}} - 33,507\bar{A}_{\text{комп}}^{\text{зп}} + \\ & + 23,016\bar{\gamma} + 195,521\beta'_{\text{ннкТ}} + 972,072\beta''_{\text{ннкТ}} + 22,477\beta_{\text{из}} - 89,614\text{HCl} + 34,288N + \\ & + 553,017\text{HCl}/\bar{H}_{\text{эн}} \end{aligned} $

Окончание табл. 2

Table 2.

$Y_2 =$	$ \begin{aligned} & -5970,955 + 54,297H_{\text{общ}} - 49,688H_{\text{э}} + 22,405H_{\text{эн}} + 178,834K_{\text{п}} - 36,325K_{\text{р}} + \\ & + 2061,696m - 6,304K_{\text{прон}} + 5776,382K_{\text{н}} + 394,727\alpha_{\text{сп}} + 133,634M_{\text{БК}} - \\ & - 4,653A_{\text{пс}} - 266,046\rho_{\text{ИК}} + 43,243\rho_{\text{БК}} + 77,899A_{0,4} - 45,395A_{1,0} - \\ & - 28,732A_{2,0} + 97,034A_{4,0} - 97,474A_{0,5} + 270,602A_{\text{комп}} + 2603,011d_{\text{зп}}/d_{\text{с}} + \\ & + 56,349A_{\text{комп}}^{\text{зп}} - 24,006\gamma - 174,066\beta'_{\text{ннкТ}} - 1198,736\beta''_{\text{ннкТ}} + 7,787\beta_{\text{из}} + \\ & + 32,644\bar{H}_{\text{общ}} - 48,607\bar{H}_{\text{э}} + 44,856\bar{H}_{\text{эн}} + 243,829\bar{K}_{\text{п}} + 22122,619\bar{m} - \\ & - 5,122\bar{K}_{\text{прон}} - 7318,124\bar{K}_{\text{н}} + 639,186\bar{\alpha}_{\text{сп}} - 163,841\bar{M}_{\text{БК}} + 0,164\bar{A}_{\text{пс}} + \\ & + 566,035\bar{\rho}_{\text{ИК}} - 15,942\bar{\rho}_{\text{БК}} - 7,982\bar{A}_{0,4} - 22,128\bar{A}_{1,0} + 30,73\bar{A}_{2,0} - \\ & - 113,557\bar{A}_{4,0} + 84,244\bar{A}_{0,5} - 25,172\bar{A}_{\text{комп}} - 2415,249\bar{d}_{\text{зп}}/\bar{d}_{\text{с}} - \\ & - 33,863\bar{A}_{\text{комп}}^{\text{зп}} + 23,299\bar{\gamma} + 188,593\bar{\beta}'_{\text{ннкТ}} + 976,2\bar{\beta}''_{\text{ннкТ}} + 22,324\bar{\beta}_{\text{из}} - \\ & - 92,449\text{HCl} + 31,137N + 559,002\text{HCl}/\bar{H}_{\text{эн}} \end{aligned} $
Вариант 3	
$Y_1 =$	$ \begin{aligned} & -624,082 + 0,034t - 0,012Q_{\text{max}} + 0,017Q_{\text{нач}} + 0,357f_1 + 0,066Q_{\text{н1}} - 120,246\text{HCl} + \\ & + 161,809V - 4,619N + 84,206V/\bar{H}_{\text{эн}} - 1119,799\text{МК} - \text{В(К)} + 1182,957\text{HCl}/V - \\ & - 229,353\text{HCl}/\bar{H}_{\text{эн}} + 6920,73\text{МК} - \text{В(К)}/V + 257,154\text{МК} - \text{В(К)}/\bar{H}_{\text{эн}} \end{aligned} $
$Y_2 =$	$ \begin{aligned} & -609,945 + 0,00002187Q_{\text{нак}} + 0,01t - 0,016Q_{\text{max}} + 0,018Q_{\text{нач}} + 0,514f_1 + \\ & + 0,074Q_{\text{н1}} - 121,877\text{HCl} + 159,691V - 6,704N + 87,603V/\bar{H}_{\text{эн}} - \\ & - 1092,043\text{МК} - \text{В(К)} + 1179,383\text{HCl}/V - 225,222\text{HCl}/\bar{H}_{\text{эн}} + \\ & + 6780,385\text{МК} - \text{В(К)}/V + 201,001\text{МК} - \text{В(К)}/\bar{H}_{\text{эн}} \end{aligned} $

Результаты

Расчеты проводились в трех вариантах, при использовании:

- 1) всего комплекса параметров;
- 2) параметров, отражающих геолого-физические свойства пласта и технологию воздействия;
- 3) параметров, отражающих технологические особенности работы скважин и залежей, а также технологию воздействия.

Полученные уравнения канонических дискриминантных функций (КДФ) представлены в табл. 2, 3, распределение скважин в осях первых двух КДФ – на рисунке, а значения процента верно сгруппированных скважин – в табл. 4. При совместном рассмотрении выборок по скважинам, в которых были проведены воздействия с использованием КСПЭО и кислотных составов на основе Алдинола-20 (рисунок, в), в расчетах были исключены параметры ALD и (МК-В(К)), характеризующие количество добавленных модификаторов и реагентов.

Анализ результатов показывает, что в осях КДФ произошло довольно четкое разделение сква-

жин по группам при использовании КСПЭО и Алдинола-20 (рисунок, а, б). Из табл. 4 видно, что процент верно сгруппированных скважин по КСПЭО по вариантам 1, 2, 3 составил в среднем соответственно 92, 88, 65 %; по Алдинолу-20 – соответственно 98, 98, 70 %.

При совместном использовании выборок скважин по обоим видам обработок процент несколько ниже по вариантам 1, 2 – 84, 81 %, и существенно ниже по варианту 3 – 41 %, что не позволяет использовать это распределение в практических целях. Необходимо отметить, что параметры, характеризующие геологические особенности пласта, имеют превалирующее значение по сравнению с параметрами, характеризующими технологические особенности работы скважин и залежей (фактор времени) при определении успешности и выделения групп скважин. Так, при воздействии с использованием КСПЭО исключение из выборки технологических факторов снижает в среднем процент верно сгруппированных скважин с 95 % (вариант 1) до 88 % (вариант 2), а при исключении геологических параметров – до 65 % (вариант 3). Особенно суще-

Таблица 3. Уравнения для расчета значений канонических дискриминантных функций при использовании кислотных составов на основе композиции Алдинол-20

Table 3. Equations for calculating the values of canonical discriminant functions when using the acid compositions based on the Al-dinol-20 composition

Вариант 1	
$Y_1 =$	$ \begin{aligned} & -59,543 - 4,222H_{\text{общ}} + 4,388H_{\text{э}} - 0,237H_{\text{эн}} - 18,69K_{\text{п}} + 2,572K_{\text{р}} - 316,971m - \\ & - 0,32K_{\text{проп}} + 102,366K_{\text{н}} - 0,208\alpha_{\text{сп}} + 7,257M_{\text{БК}} - 0,923A_{\text{пс}} - 6,596\rho_{\text{ИК}} - \\ & - 5,015\rho_{\text{БК}} + 0,263A_{0,4} + 6,179A_{1,0} - 1,497A_{2,0} + 1,591A_{4,0} + 0,036A_{0,5} - \\ & - 2,336A_{\text{комп}} - 12,701d_{\text{зп}}/d_{\text{с}} + 1,595A_{\text{комп}}^{\text{зп}} - 0,022\gamma + 8,547\beta'_{\text{ннк}} + \\ & + 2,782\beta''_{\text{ннк}} + 0,352\beta_{\text{из}} + 0,029\bar{H}_{\text{общ}} - 2,395\bar{H}_{\text{э}} + 0,928\bar{H}_{\text{эн}} + 1,027\bar{K}_{\text{п}} + \\ & + 163,294\bar{m} + 0,511\bar{K}_{\text{проп}} - 57,491\bar{K}_{\text{н}} - 23,002\bar{\alpha}_{\text{сп}} - 2,408\bar{M}_{\text{БК}} + \\ & + 0,686\bar{A}_{\text{пс}} + 2,901\bar{\rho}_{\text{ИК}} - 2,335\bar{A}_{\text{комп}}^{\text{зп}} + 7,052N \end{aligned} $
$Y_2 =$	$ \begin{aligned} & -9,904 + 0,681H_{\text{общ}} - 0,863H_{\text{э}} + 1,315H_{\text{эн}} + 0,453K_{\text{п}} - 0,684K_{\text{р}} + 52,346m + \\ & + 0,345K_{\text{проп}} + 92,188K_{\text{н}} - 51,041\alpha_{\text{сп}} + 5,446M_{\text{БК}} - 0,315A_{\text{пс}} - 5,771\rho_{\text{ИК}} + \\ & + 0,548\rho_{\text{БК}} + 0,001A_{0,4} - 1,229A_{1,0} + 0,732A_{2,0} - 0,713A_{4,0} - 0,479A_{0,5} + \\ & + 0,53A_{\text{комп}} + 9,344d_{\text{зп}}/d_{\text{с}} + 0,063A_{\text{комп}}^{\text{зп}} - 0,131\gamma - 1,862\beta'_{\text{ннк}} + 6,175\beta''_{\text{ннк}} - \\ & - 0,17\beta_{\text{из}} + 0,672\bar{H}_{\text{общ}} + 0,571\bar{H}_{\text{э}} - 2,372\bar{H}_{\text{эн}} + 12,962\bar{K}_{\text{п}} + 17,986\bar{m} - \\ & - 0,411\bar{K}_{\text{проп}} - 115,488\bar{K}_{\text{н}} + 57,137\bar{\alpha}_{\text{сп}} - 6,139\bar{M}_{\text{БК}} + 0,407\bar{A}_{\text{пс}} + \\ & + 6,754\bar{\rho}_{\text{ИК}} + 0,363\bar{A}_{\text{комп}}^{\text{зп}} - 0,478N \end{aligned} $
Вариант 2	
$Y_1 =$	$ \begin{aligned} & -56,866 - 4,028H_{\text{общ}} + 4,12H_{\text{э}} - 0,328H_{\text{эн}} - 14,942K_{\text{п}} + 2,426K_{\text{р}} - 295,945m - \\ & - 0,323K_{\text{проп}} + 94,116K_{\text{н}} - 4,238\alpha_{\text{сп}} + 7,176M_{\text{БК}} - 0,902A_{\text{пс}} - 6,663\rho_{\text{ИК}} - \\ & - 5,004\rho_{\text{БК}} + 0,314A_{0,4} + 6,175A_{1,0} - 1,361A_{2,0} + 1,424A_{4,0} - 0,061A_{0,5} - \\ & - 2,45A_{\text{комп}} - 12,871d_{\text{зп}}/d_{\text{с}} + 1,583A_{\text{комп}}^{\text{зп}} - 0,031\gamma + 8,407\beta'_{\text{ннк}} + 2,604\beta''_{\text{ннк}} + \\ & + 0,339\beta_{\text{из}} - 0,067\bar{H}_{\text{общ}} - 2,286\bar{H}_{\text{э}} + 1,055\bar{H}_{\text{эн}} + 0,863\bar{K}_{\text{п}} + 135,185\bar{m} + \\ & + 0,517\bar{K}_{\text{проп}} - 48,969\bar{K}_{\text{н}} - 19,16\bar{\alpha}_{\text{сп}} - 2,401\bar{M}_{\text{БК}} + 0,675\bar{A}_{\text{пс}} + 3,054\bar{\rho}_{\text{ИК}} - \\ & - 2,31\bar{A}_{\text{комп}}^{\text{зп}} + 7,301N \end{aligned} $
$Y_2 =$	$ \begin{aligned} & -6,156 + 0,908H_{\text{общ}} - 1,164H_{\text{э}} + 1,209H_{\text{эн}} + 4,412K_{\text{п}} - 0,846K_{\text{р}} + 75,008m + \\ & + 0,342K_{\text{проп}} + 82,011K_{\text{н}} - 54,593\alpha_{\text{сп}} + 5,229M_{\text{БК}} - 0,28A_{\text{пс}} - 5,746\rho_{\text{ИК}} + \\ & + 0,62\rho_{\text{БК}} + 0,053A_{0,4} - 1,284A_{1,0} + 0,878A_{2,0} - 0,898A_{4,0} - 0,575A_{0,5} + \\ & + 0,444A_{\text{комп}} + 9,223d_{\text{зп}}/d_{\text{с}} + 0,034A_{\text{комп}}^{\text{зп}} - 0,139\gamma - 2,058\beta'_{\text{ннк}} + \\ & + 5,883\beta''_{\text{ннк}} - 0,187\beta_{\text{из}} + 0,564\bar{H}_{\text{общ}} + 0,705\bar{H}_{\text{э}} - 2,23\bar{H}_{\text{эн}} + 12,648\bar{K}_{\text{п}} - \\ & - 12,025\bar{m} - 0,407\bar{K}_{\text{проп}} - 105,262\bar{K}_{\text{н}} + 60,7\bar{\alpha}_{\text{сп}} - 6,053\bar{M}_{\text{БК}} + 0,383\bar{A}_{\text{пс}} + \\ & + 6,824\bar{\rho}_{\text{ИК}} + 0,41\bar{A}_{\text{комп}}^{\text{зп}} - 0,296N \end{aligned} $
Вариант 3	
$Y_1 =$	$ \begin{aligned} & -16,485 + 0,004t + 0,001Q_{\text{нач}} + 0,041f_1 + 0,003Q_{\text{н1}} - 3,491\text{ALD} + 1,751V_{\text{к}} + \\ & + 1,263N - 1,276V/\bar{H}_{\text{эн}} + 24,076\text{ALD}/V + 4,031\text{ALD}/\bar{H}_{\text{эн}} \end{aligned} $
$Y_2 =$	$ \begin{aligned} & -0,762 + 0,014t - 0,003Q_{\text{мах}} + 0,003Q_{\text{нач}} + 0,061f_1 + 0,016Q_{\text{н1}} + 0,384\text{ALD} - \\ & - 0,307V_{\text{к}} + 0,397N - 2,751V/\bar{H}_{\text{эн}} - 11,732\text{ALD}/V + 5,84\text{ALD}/\bar{H}_{\text{эн}} \end{aligned} $

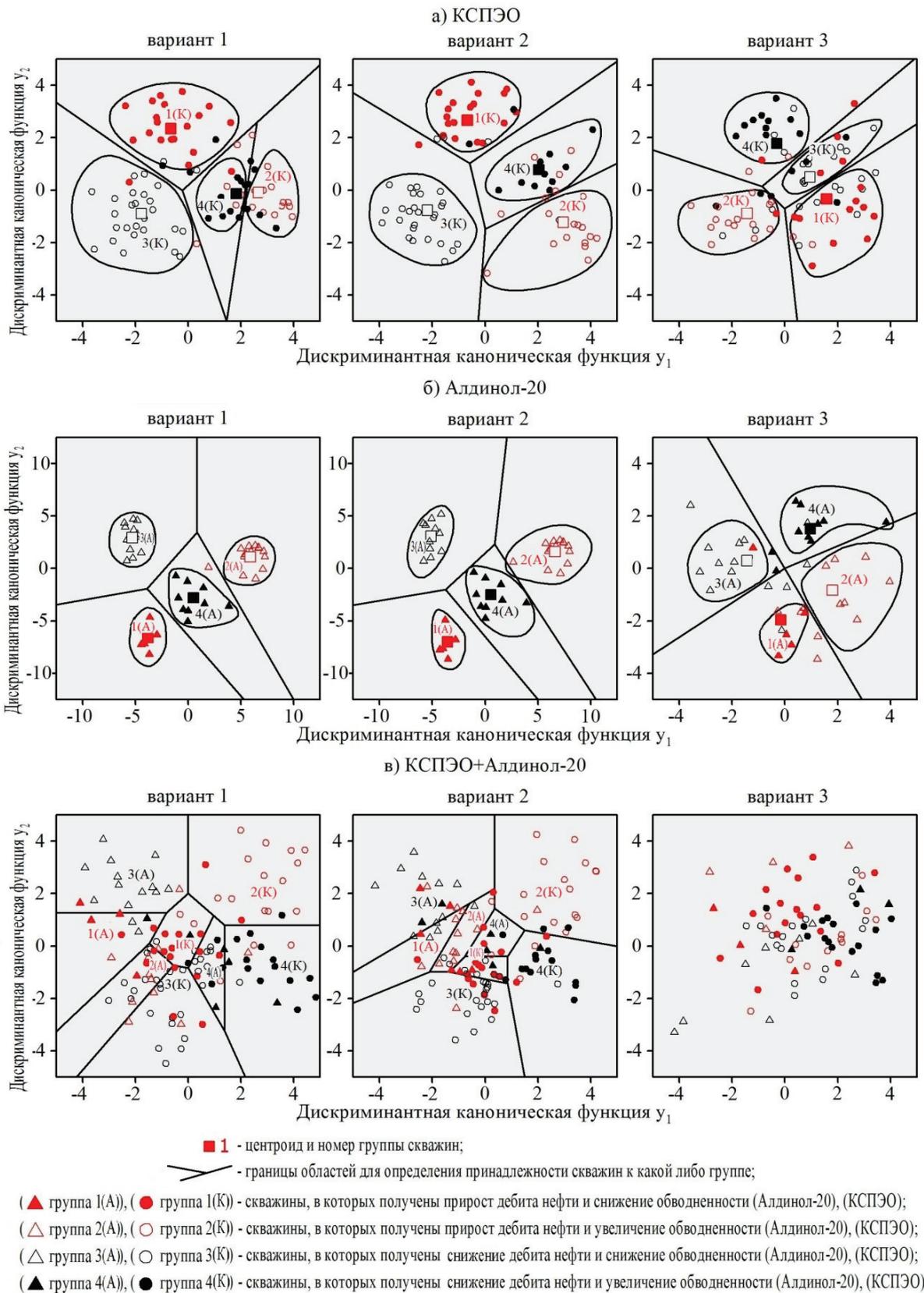


Рисунок. Распределение скважин в осях канонических дискриминантных функций

Figure. Well distribution in the canonical discriminant functions axes

Таблица 4. Процент верно сгруппированных скважин

Table 4. Correctly grouped wells percentage

Вид воздействия Effect	Группа скважин Well group	Вариант/Version		
		1	2	3
КСПЭО KSPEO	1(K)	95	90	66
	2(K)	94	89	72
	3(K)	90	90	62
	4(K)	88	82	59
Алдинол-20 Aldinol-20	1(A)	100	100	80
	2(A)	93	93	47
	3(A)	100	100	80
	4(A)	100	100	71
КСПЭО KSPEO	1(K)	90	90	40
	2(K)	83	83	50
	3(K)	93	83	28
	4(K)	82	82	47
Алдинол-20 Aldinol-20	1(A)	80	80	60
	2(A)	73	73	13
	3(A)	93	86	43
	4(A)	80	75	50

ственное снижение наблюдается при совместном использовании выборок, причем при этом наблюдается в целом снижение эффективности разделения скважин, что связано с увеличением количества групп и исключением из анализа объемов модификаторов, которые, по-видимому, вносят свой вклад в определение успешности воздействий.

Использование контрольной выборки из 12-ти скважин, в которых было проведено 6 обработок с использованием кислотных составов на основе Алдинола и 6 – КСПЭО, анализ попадания этих скважин в группы по факту и по расчетам, анализ дискриминантных функций и значений геолого-технологических параметров по этим скважинам, а также проведение многовариантных расчетов позволили получить интересные результаты, представленные в табл. 5.

Видно, что точность прогноза (из сравнения фактических результатов попадания скважин в

Таблица 5. Результаты проведения воздействий и рекомендуемые мероприятия, которые необходимо было провести для повышения успешности

Table 5. Impact results and recommended activities to be carried out to improve impact success

Условный номер скважины (вид воздействия) Conditional number of the well (type of impact)	Группа Group		Возможность перевода в группу с большей успешностью Possibility to transfer to a group with greater success	Причины низкой эффективности Reasons for low efficiency	Какие мероприятия необходимо было провести для повышения успешности воздействия Activities, required to enhance the success of the impact
	факт / fact	расчет / calculation			
1 (Алдинол-20) 1 (Aldinol-20)	3(A)	3(A)	1(A)	Снижение добычных возможностей скважины по нефти Decrease in wells oil production capabilities	Дополнительная перфорация+дополнительный объем закачки раствора соляной кислоты и алдинола Additional perforation + additional injection of hydrochloric acid solution and Aldinol volume
2 (Алдинол-20) 2 (Aldinol-20)	4(A)	2(A)	2(A)	Неполное использование потенциала скважины Incomplete use of the well potential	Использование более производительного насоса More productive pump usage
3 (Алдинол-20) 3 (Aldinol-20)	2(A)	2(A)	1(K)	Неверно подобран вид воздействия Wrong type of impact	Воздействие необходимо было провести раньше. На данном этапе необходимо было произвести КСПЭО Treatment had to be carried out earlier. At this stage, the treatment should have been carried out using KSPEO
4 (Алдинол-20) 4 (Aldinol-20)	4A)	4(A)	4(A)	Значительная обводненность продукции Significant water cut of production	Предварительно проведение изоляционных работ по снижению обводненности Prior insulation work to reduce water cut
5(Алдинол-20) 5 (Aldinol-20)	2(A)	2(A)	1(A)	Закачаны излишние удельные объемы раствора Excessive specific volume of solution is injected	Снижение удельных объемов закачки кислоты и алдинола Reduction of acid and Aldinol specific volumes injection
6 (Алдинол-20) 6 (Aldinol-20)	4(A)	4(A)	3(K)	Высокая степень выработки запасов пласта. Неправильно выбран вид воздействия High extent of reservoirs recovery. Invalid impact type selected	Воздействие необходимо было произвести раньше. На данном этапе необходимо было произвести КСПЭО Treatment had to be carried out earlier. At this stage, the treatment should have been carried out using KSPEO
7 (КСПЭО) 7 (KSPEO)	3(K)	3(K)	1(A)	Неправильно выбран вид воздействия Invalid impact type selected	Необходимо было произвести обработку с использованием Алдинола Treatment should have been carried out using Aldinol
8 (КСПЭО) 8 (KSPEO)	2(K)	1(K)	1(K)	Нарушение целостности цементного кольца Cement ring inconsistency	Ликвидация заколонных перетоков Behind-the-casing flow elimination
9 (КСПЭО) 9 (KSPEO)	4(K)	4(K)	2(K)	Закачан недостаточный удельный объем раствора Insufficient specific volume of solution is injected	Увеличение удельных объемов закачиваемого раствора Injected solution specific volumes increasing
10 (КСПЭО) 10 (KSPEO)	2(K)	3(K)	1(A)	Неправильно выбран вид воздействия Invalid impact type selected	Необходимо было произвести обработку с использованием Алдинола Treatment should have been carried out using Aldinol
11 (КСПЭО) 11 (KSPEO)	3(K)	3(K)	3(K)	Отсутствие моделей по другим видам воздействия Lack of models for other types of treatment	Для условий использования обоих обработок дополнительный ресурс не найден No additional resource found for both treatments conditions
12 (КСПЭО) 12 (KSPEO)	1(K)	1(K)	1(K)	-	Нет необходимости повышения успешности There is no need to improve the success of treatment

группу и расчетных) составляет 75 %, что является довольно высоким показателем, хотя эта цифра в целом несколько ниже, чем представленные в табл. 4 значения процента верно сгруппированных скважин. Необходимо отметить, что если бы в скважине 2 был поставлен после проведения воздействия более производительный насос, а в скважине 8 была проведена ликвидация заколонных перетоков, то точность прогноза составила бы 91,7 %.

Использование информации, полученной на основе анализа значений дискриминантных функций и параметров, в них входящих (табл. 5), позволило выявить причины недостаточно высокой эффективности воздействий и определить, какие мероприятия необходимо было провести для повышения успешности воздействия (переход от 4-й к 1-й группе).

Заключение

Таким образом, полученные уравнения КДФ и представление групп скважин по видам обработок

в осях этих функций позволили выделить области, использование которых устраняет целый ряд неопределенностей при решении задач, направленных на повышение эффективности диагностирования и воздействия на ПЗП.

Результаты позволяют в условиях аналогичных объектов:

- по значениям геолого-технологических параметров устанавливать, к какой группе (по успешности) относится скважина;
- устранить влияние «псевдоэффекта» при оценке результатов воздействия и путем изменения технологических параметров воздействия переводить скважины из зон «псевдоэффекта» в зоны с однозначно положительным эффектом;
- оперативно принимать управляющее решение и использовать опыт обработок той группы, к которой относится конкретная скважина;
- проводить адаптацию технологии воздействия к конкретным геологическим условиям и адресное воздействие на ПЗП с учетом фактора времени (стадийности разработки).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муслимов Р.Х. Современные методы повышения нефтеизвлечения: проектирование, оптимизация и оценка эффективности. – Казань: ФЭН, 2005. – 688 с.
2. Economides J.M., Nolte K.I. Reservoir stimulation. – West Sussex, England: John Wiley and Sons, 2000. – 856 p.
3. Expanding Applications for Viscoelastic Surfactants / S. Kefi, J. Lee, T.L. Pope, P. Sullivan, E. Nelson, A.N. Hernandez, T. Olsen, M. Parlar, B. Powers, A.R.A. Wilson, A. Twynam // Oilfield Review. – 2004. – V. 16. – № 4. – P. 10–23.
4. Prospects of Application of Multi-Functional Well Killing Fluids in Carbonate Reservoirs / Yu.V. Zeigman, V.Sh. Mukhametshin, A.R. Khafizov, S.B. Kharina // SOCAR Proceedings. – 2016. – № 3. – P. 33–39.
5. Ибрагимов Н.Г., Мусабилов М.Х., Яргиев А.Ф. Опыт промышленной реализации импортзамещающих технологий интенсификации добычи нефти в ПАО «Татнефть» // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 8. – С. 86–89.
6. Шпуров И.В., Захаренко В.А., Фурсов А.Я. Дифференцированный анализ степени вовлечения и выработанности запасов юрских залежей в пределах Западно-Сибирской НГП // Недрапользование XXI век. – 2015. – № 1 (51). – С. 12–19.
7. Хисамов Р.С., Орлов Г.А., Мусабилов М.Х. Концепция развития и рационального применения солянокислотных обработок скважин // Нефтяное хозяйство. – 2003. – № 4. – С. 43–45.
8. Ахметов Р.Т., Мухаметшин В.В., Андреев А.В. Интерпретация кривых капиллярного давления при смешанной смачиваемости // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2017. – № 4. – С. 40–43.
9. Якупов Р.Ф., Мухаметшин В.Ш. Вопросы эффективности разработки низкопродуктивных карбонатных коллекторов на примере Турнейского яруса Туймазинского месторождения // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 12. – С. 106–110.
10. Improved Oil Recovery from Carbonate Reservoirs by Chemical Stimulation / X. Xie, W.W. Weiss, Z.J. Tong, N.R. Morrow // SPE Journal. – 2005. – V. 10. – № 3. – P. 276–285.
11. Multi-Scale Evaluation of Nanoparticle-Stabilized CO₂-in-Water Foams: from the Benchtop to the Field / A. Worthen, A. Taghavy, A. Argoonsri, I. Kim, K. Johnston, C. Huh, S. Bryant, D. DiCarlo // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Houston, Texas, USA, 2015. – P. 1–13.
12. Экспериментальное исследование вязкостных свойств эмульсионных систем с содержанием наночастиц SiO₂ / Ю.В. Зейгман, В.Ш. Мухаметшин, В.В. Сергеев, Ф.С. Кинзябаев // Нанотехнологии в строительстве. – 2017. – Т. 9. – № 2. – С. 16–38. DOI: dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-2-16-38 (дата обращения: 08.05.2017).
13. Anderson V.J., Pearson J.R.A., Boek E.S. The rheology of worm-like micellar fluids // Rheology Reviews. – 2006. – P. 217–253.
14. Andreev A.V., Mukhametshin V.Sh., Kotenev Yu.A. Deposit Productivity Forecast in Carbonate Reservoirs with Hard to Recover Reserves // SOCAR Proceedings. – 2016. – № 3. – P. 40–45.
15. Ограничение водопитока в горизонтальных скважинах на месторождениях с трудноизвлекаемыми запасами нефти / Р.Р. Кадыров, Р.Х. Низаев, А.Ф. Яргиев, В.В. Мухаметшин // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 5. – С. 44–47.
16. Zakaria A.S., Nasr-El-Din H.A. A Novel Polymer-Assisted Emulsified-Acid System Improves the Efficiency of Carbonate Matrix Acidizing // SPE Journal. – 2016. – V. 21. – № 3. – P. 47–70.
17. The Usage of Principles of System Geological-Technological Forecasting in the Justification of the Recovery Methods / V.V. Mukhametshin, V.E. Andreev, G.S. Dubinsky, Sh.Kh. Sultanov, R.T. Akhmetov // SOCAR Proceedings. – 2016. – № 3. – P. 46–51.
18. Особенности выбора составов жидкостей глушения скважин в осложненных условиях эксплуатации скважин / Ю.В. Зейгман, В.Ш. Мухаметшин, А.П. Хафизов, С.Б. Харина, Е.М. Абуталипова, А.Н. Авренюк // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 1. – С. 66–69.
19. Lin Z., Eads C.D. Polymer-induced structural transitions in oleate solutions: microscopy, rheology, and nuclear magnetic resonance studies // Langmuir. – 1997. – V. 13. – P. 2647–2654.
20. К вопросу выбора технологии кислотного воздействия для интенсификации добычи нефти / Ю.В. Зейгман, А.В. Лысенков, В.В. Мухаметшин, Ш.Х. Султанов, Ю.А. Котенев // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2017. – № 6. – С. 44–50.
21. Интенсификация добычи нефти в осложненных условиях / А.Ш. Газизов, А.А. Газизов, М.М. Кабилов, Р.Г. Ханнанов. – Казань: Центр инновационных технологий, 2008. – 303 с.
22. Земцов Ю.В. Развитие и совершенствование ремонтно-изоляционных работ на месторождениях Западной Сибири. – СПб.: Недра, 2014. – 319 с.

23. Снижение рисков принятия низкоэффективных управляющих решений при использовании кислотных составов, предотвращающих эмульсионобразование / В.В. Мухаметшин, В.Е. Андреев, Ю.В. Зейгман, Ю.А. Котенев, Ш.Х. Султанов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2017. – № 5. – С. 36–42.
24. Глуценко В.Н., Силин М.А. Нефтепромысловая химия в 5 т. Т. 4. Кислотная обработка скважин. – М.: Интерконтакт наука, 2010. – 704 с.
25. Improved Oil Recovery by Nanofluids Flooding: an Experimental Study / O. Torsater, B. Engeset, L. Hendraningrat, S. Suwarno // SPE Kuwait International Petroleum Conference and Exhibition. – Kuwait, 2012. – P. 1–9.
26. Дементьев Л.Ф. Математические методы и ЭВМ в нефтегазовой геологии. – М.: Недра, 1983. – 189 с.
27. Shokrlu Y.H., Babadagli T. Transportation and Interaction of Nano and Micro Size Metal Particles Injected to Improve Thermal Recovery of Heavy-Oil // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Denver, Colorado, USA, 2011. – P. 1–12.
28. Хайрединов Н.Ш., Попов А.М., Мухаметшин В.Ш. Повышение эффективности заводнения низкопродуктивных залежей нефти в карбонатных коллекторах // Нефтяное хозяйство. – 1992. – № 9. – С. 18–20.
29. Мухаметшин В.В. О необходимости и создании единого комплексного метода геолого-промыслового анализа и обобщения эффективности воздействия на призабойную зону пласта // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 4. – С. 80–84.

Поступила 22.05.2017 г.

Информация об авторах

Мухаметшин В.В., кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газонефтяных месторождений Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 622.276.63

ELIMINATING UNCERTAINTIES IN SOLVING BOTTOM HOLE ZONE STIMULATION TASKS

Vyacheslav V. Mukhametshin,

vsh@of.ugntu.ru

Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov Street, Ufa, 450062, Russia.

Relevance. Bottomhole formation zone treatment experience analysis shows that oil production stimulation operations success on average amounts to 50 %. Alongside with this, there are moments that do not allow interpreting unequivocally success and effectiveness due to the application of different evaluation criteria. These criteria often contradict each other and create uncertainty in the results interpretation, as a consequence, make it difficult to solve the problem of increasing the effectiveness of bottomhole zone impact.

The aim of the research is to eliminate various kinds of uncertainties in the wells and technologies justification and selection, taking into account the geological and technological features of the development zones.

Methods. Based on the canonical discriminant analysis, the experience of various types of oil production stimulation on hard-to-recover terrigenous reservoirs was studied.

Results. The authors obtained the apparatus based on the use of canonical discriminant functions equations, the wells groups representation by the treatment types in the axes of these functions, and their confinement areas identification, allowing eliminating a number of uncertainties in solving the tasks of increasing the efficiency of diagnosis and impact on bottomhole zone.

Conclusions. The results allow in the analyzed and similar zones conditions:

- according to the geological and technological parameters determining the belonging of the well to a certain group;
- to eliminate the «pseudo-effect» influence when estimating the results of impact; to transfer the wells from the «pseudo-effect» zones to the uniquely positive effect zones changing the technological impact parameters;
- to make a management decision promptly and use the experience in treating the group to which the particular well belongs;
- to adapt the impact technology to specific geological conditions and address the bottomhole zone impact, taking into account the time factor (development stages).

Key words:

«Pseudoeffect», time factor, bottom hole zone treatment, technology adoption, targeted stimulation.

REFERENCES

1. Muslimov R.Kh. *Sovremennyye metody povysheniya nefteizvlecheniya: proektirovanie, optimizatsiya i otsenka effektivnosti* [Modern methods of oil recovery increasing: design, optimization and performance evaluation]. Kazan, FEN Publ., 2005. 688 p.
2. Economides J.M., Nolte K.I. *Reservoir stimulation*. West Sussex, England, John Wiley and Sons, 2002. 856 p.
3. Kefi S., Lee J., Pope T.L., Sullivan P., Nelson E., Hernandez A.N., Olsen T., Parlar M., Powers B., Wilson A.R.A., Twynam A. Expanding Applications for Viscoelastic Surfactants. *Oilfield Review*, 2004, vol. 16, no. 4, pp. 10–23.
4. Zeigman Yu.V., Mukhametshin V.Sh., Khafizov A.R., Kharina S.B. Prospects of Application of Multi-Functional Well Killing Fluids in Carbonate Reservoirs. *SOCAR Proceedings*, 2016, no. 3, pp. 33–39.
5. Ibragimov N.G., Musabirov M.Kh., Yartiev A.F. «Tatneft» experience in commercialization of import-substituting well stimulation technologies. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2015, no. 8, pp. 86–89. In Rus.
6. Shpurov I.V., Zakharenko V.A., Fursov A.Ya. Differentiated analysis of the degree of involvement and depletion of stocks of Jurassic deposits in the Western Siberian oil-and-gas province. *Nedropolzovanie XXI vek*, 2015, no. 1 (51), pp. 12–19. In Rus.
7. Khisamov R.S., Orlov G.A., Musabirov M.Kh. Concept of development and rational utilization of hydrochloride acid wells treatment. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2003, no. 4, pp. 43–45. In Rus.
8. Akhmetov R.T., Mukhametshin V.V., Andreev A.V. Interpretatsiya krivyykh kapillyarnogo davleniya pri smeshannoy smachivayemosti [Interpretation of capillary pressure curves in case of mixed-wettability]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2017, no. 4, pp. 40–43.
9. Yakupov R.F., Mukhametshin V.Sh. Issues of efficiency of low-productivity carbonate reservoir development on the example of Turnaisian stage of Tuymazinskoye field. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2013, no. 12, pp. 106–110. In Rus.
10. Xie X., Weiss W.W., Tong Z.J., Morrow N.R. Improved Oil Recovery from Carbonate Reservoirs by Chemical Stimulation. *SPE Journal*, 2005, vol. 10, no. 3, pp. 276–285.
11. Worthen A., Taghavy A., Aroonsri A., Kim I., Johnston K., Huh C., Bryant S., DiCarlo D. Multi-Scale Evaluation of Nanoparticle-Stabilized CO₂-in-Water Foams: From the Benchtop to the Field. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Houston, Texas, USA, 2015. pp. 1–13.
12. Zeigman Yu.V., Mukhametshin V.Sh., Sergeev V.V., Kinzybaev F.S. Experimental study of viscosity properties of emulsion system with SiO₂ nanoparticles. *Nanotechnologies in Construction*, 2017, vol. 9, no. 2, pp. 16–38. DOI: dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-2-16-38 (accessed 08 May 2017).
13. Anderson V.J., Pearson J.R.A., Boek E.S. The rheology of worm-like micellar fluids. *Rheology Reviews*, 2006, pp. 217–253.
14. Andreev A.V., Mukhametshin V.Sh., Kotenev Yu.A. Deposit Productivity Forecast in Carbonate Reservoirs with Hard to Recover Reserves. *SOCAR Proceedings*, 2016, no. 3, pp. 40–45.
15. Kadyrov R.R., Nizaev R.Kh., Yartiev A.F., Mukhametshin V.V. Novel water shut-off technique for horizontal wells at fields with hard-to-recover oil reserves. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2017, no. 5, pp. 44–47. In Rus.
16. Zakaria A.S., Nasr-El-Din H.A. A Novel Polymer-Assisted Emulsified-Acid System Improves the Efficiency of Carbonate Matrix Acidizing. *SPE Journal*, 2016, vol. 21, no. 3, pp. 47–70.
17. Mukhametshin V.V., Andreev V.E., Dubinsky G.S., Sultanov Sh.Kh., Akhmetov R.T. The Usage of Principles of System Geological-Technological Forecasting in the Justification of the Recovery Methods. *SOCAR Proceedings*, 2016, no. 3, pp. 46–51.
18. Zeigman Yu.V., Mukhametshin V.Sh., Khafizov A.R., Kharina S.B., Abutalipova E.M., Avrenyuk A.N. Peculiarities of selec-

- ting well-killing fluids composition for difficult conditions. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2017, no. 1, pp. 66–69. In Rus.
19. Lin Z., Eads C.D. Polymer-induced structural transitions in oleate solutions: microscopy, rheology, and nuclear magnetic resonance studies. *Langmuir*, 1997, vol. 13, pp. 2647–2654.
 20. Zeigman Yu.V., Lysenkov A.V., Mukhametshin V.V., Sultanov Sh.Kh., Kotenev Yu.A. K voprosu vybora tekhnologii kislotnogo vozdeystviya dlya intensivatsii dobychi nefi [To the issue of selecting the technique of acidizing for enhancing oil production]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftnykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2017, no. 6, pp. 44–50.
 21. Gazizov A.Sh., Gazizov A.A., Kabiroy M.M., Khannanov R.G. *Intensifikatsiya dobychi nefi v oslozhnennykh usloviyakh* [Oil production in complicated conditions intensification]. Kazan, Tsentr innovatsionnykh tekhnologiy Publ., 2008. 303 p.
 22. Zemtsov Yu.V. *Razvitie i sovershenstvovanie remontno-izolyatsionnykh rabot na mestorozhdeniyakh Zapadnoy Sibiri* [Development and improvement of repair and insulation works in the Western Siberia fields]. Saint-Petersburg, Nedra Publ., 2014. 319 p.
 23. Mukhametshin V.V., Andreev V.E., Zeigman Yu.V., Kotenev Yu.A., Sultanov Sh.Kh. Snizhenie riskov prinyatiya nizkofektivnykh upravlyayushchikh resheniy pri ispolzovanii kislotnykh sostavov, predotvrashchayushchikh emulsiobrazovanie [Reducing risks of low-efficiency decisions during acidization for emulsifying prevention]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftnykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2017, no. 5, pp. 36–42.
 24. Glushchhenko V.N., Silin M.A. *Neftpromyslovaya khimiya v 5 t. T. 4. Kislotnaya obrabotka skvazhin* [Oilfield chemistry in 5 vol. Vol. 4. Acid treatment of wells]. Moscow, Interkontakt nauka Publ., 2010. 704 p.
 25. Torsater O., Engeset B., Hendraningrat L., Suwarno S. Improved Oil Recovery by Nanofluids Flooding: An Experimental Study. *SPE Kuwait International Petroleum Conference and Exhibition*. Kuwait, 2012. pp. 1–9.
 26. Dementev L.F. *Matematicheskie metody i EVM v neftegazovoy geologii* [Mathematical methods and computers in petroleum geology]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 189 p.
 27. Shokrlu Y.H., Babadagli T. Transportation and Interaction of Nano and Micro Size Metal Particles Injected to Improve Thermal Recovery of Heavy-Oil. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Denver, Colorado, USA, 2011. pp. 1–12.
 28. Khayredinov N.Sh., Popov A.M., Mukhametshin V.Sh. Povyshenie effektivnosti zavodneniya nizkoproduktivnykh zalezhey nefi v karbonatnykh kollektorakh [Improving the efficiency of waterflooding low-yielding deposits in carbonate reservoirs]. *Neftyanoe khozyaystvo*, 1992, no. 9, pp. 18–20.
 29. Mukhametshin V.V. On the need for developing a unified comprehensive method of geological and field analysis and integration of data on effective influence on the bottom-hole formation zone. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2017, no. 4, pp. 80–84. In Rus.

Received: 22 May 2017.

Information about the authors

Vyacheslav V. Mukhametshin, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 621.039

К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ РЕЖИМОВ ИСПЫТАНИЙ АМПУЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ РЕАКТОРЕ

Скаков Мажын Канапинович¹,
skakov@nnc.kz

Мухамедов Нуржан Еролович²,
mukhamedov@nnc.kz

Дерявко Илья Ильич¹,
ilya@nnc.kz

¹ РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан»,
Казахстан, 071100, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 10.

² Государственный университет имени Шакарима города Семей,
Казахстан, 071400, г. Семей, ул. Глинки, 20а.

Актуальность работы обусловлена тем, что в результате расчетно-экспериментальных исследований будет дополнена информация о процессе протекания тяжелой аварии энергетического реактора на быстрых нейтронах.

Цель работы: определение теплового состояния стальной капсулы в ампульном экспериментальном устройстве, предназначенном для получения расплава материалов активной зоны быстрого энергетического реактора в условиях, моделирующих тяжелую реакторную аварию.

Методы исследования: методы численного моделирования нейтронно-физических процессов с использованием специализированных кодов MCNP5 основанного на методе Monte-Carlo, а также метод конечно-разностного элементного анализа систем, реализованный в вычислительном программном комплексе ANSYS 14.0.

Результаты. Выполнены нейтронно-физические и тепловые расчеты ампульного облучательного устройства, предназначенного для исследования тяжелых аварий быстрых энергетических реакторов (данное устройство, в котором осуществляется плавление материалов активной зоны реактора, изготовлено из материалов, температуры плавления которых ниже температуры получаемого расплава кориума). В результате проведенных нейтронно-физических расчетов был определен коэффициент связи между энерговыделением в ТВС внутриреакторного ампульного облучательного устройства и энерговыделением в активной зоне Импульсного Графитового Реактора. Из результатов теплофизического расчета следует, что при проведении реакторных испытаний в выбранном режиме работы реактора максимальная температура у топлива на уровне центра активной зоны составит ~3000 К, у оболочки твэла ~2500 К, у танталового стакана ~806 К, у стальной капсулы ~693 К. При таких значениях температур конструкция экспериментального устройства сохранит свою целостность, и тем самым будет достигнута безопасность проведения эксперимента по получению натурального кориума.

Ключевые слова:

Ампульное устройство, твэл, тяжелая авария реактора, кориум, расплав.

Введение

Одной из важнейших задач атомной энергетики является обеспечение безопасной эксплуатации ядерных энергетических установок в различных режимах работы [1–4]. В связи с этим одним из важных условий безопасного развития атомной энергетики является изучение процессов, протекающих в активной зоне реактора в ходе развития тяжелой аварии [5–7]. Наиболее информативные данные о возможных последствиях тяжелых аварий энергетических реакторов, вызванных различными исходными событиями, могут быть получены в условиях экспериментов в исследовательских реакторах, позволяющих обеспечить максимально приближенное к реальным условиям моделирование таких процессов [8–12]. Подобные исследования позволяют получить комплекс экспериментальных данных для разработки и верификации расчетных методик определения параметров тяжелых аварий при обосновании безопасности реакторных установок АЭС.

В рамках программы по исследованию тяжелых аварий быстрых энергетических реакторов с плавлением активной зоны в ИАЭ НЯЦ РК была разработана и изготовлена серия ампульных экспериментальных устройств (ЭУ) и проведены их испытания [13, 14] на исследовательском реакторе ИГР [15] в целях изучения закономерностей плавления и перемещения расплава топлива модельной ТВС, а также особенностей взаимодействия расплава с конструкционными материалами и теплоносителем.

Важнейшим этапом подготовки внутриреакторных испытаний экспериментальных устройств с модельными ТВС является обоснование режимов их испытаний. Сложность решения данной задачи обусловлена необходимостью реализации заданных параметров в объекте испытаний, которые позволяют создать условия для реализации требуемой последовательности событий в эксперименте и получить качественные экспериментальные данные. С другой стороны, существует ряд условий,

определяемых, в первую очередь, требованиями безопасности, которые должны быть соблюдены в процессе эксперимента и которые накладывают ограничения на выбор режимов испытаний.

Целью данной работы является определение теплового состояния стальной капсулы в ампульном экспериментальном устройстве, предназначенном для получения расплава материалов активной зоны быстрого энергетического реактора в условиях, моделирующих тяжелую реакторную аварию.

Методика исследований

Нейтронно-физические расчеты для предварительного определения коэффициентов связи между удельным энерговыделением в топливе ампульного ЭУ и энерговыделением в активной зоне исследовательского реактора ИГР, как и расчеты неравномерности энерговыделения по объему ТВС, выполнялись с использованием объединенной модели, созданной на базе бенч-марк модели ампульного графитового реактора (ИГР) [16] и расчетной модели ампульного облучательного устройства с использованием расчетного кода MCNP с библиотекой ENDF/B-VI [17] для холодного состояния реактора. При этом предполагалось, что разогрев графитовой кладки реактора ИГР не влияет на распределение энерговыделения в объеме испытываемой ТВС.

Расчет теплового состояния капсулы в ампульном ЭУ при предварительном разогреве и реализации диаграммы энерговыделения в топливе модельной ТВС выполнялся с применением трехмерной расчетной модели. Расчеты проводились с использованием программного комплекса ANSYS [18].

С целью наиболее точного описания тепловых процессов ампульное ЭУ было детально описано трехмерной расчетной моделью, которая использовалась для оценки теплового состояния ЭУ при следующих ситуациях:

- предварительный разогрев капсулы ЭУ омическим нагревателем;
- разогрев топлива за счет внутреннего энерговыделения.

Результаты исследований

Разработанное нами [19] ампульное облучательное устройство предназначено для получения расплава кориума в условиях, моделирующих тяжелую аварию энергетического реактора. Конструкция облучательного устройства содержит ампулу, защитный экран, капсулу, ловушку и систему измерения параметров.

Основным конструктивным элементом является прочная ампула. Ампула играет роль защитного барьера, предотвращающего выход радиоактивных материалов в полость центрального экспериментального канала (ЦЭК) реактора ИГР и далее в помещение реакторного зала, а также является силовым барьером, разделяющим полость ЦЭК и по-

лость экспериментального устройства по давлению.

Кроме этого, в состав ампульного облучательного устройства входят следующие основные элементы, важные с точки зрения обеспечения безопасности проведения эксперимента:

- цилиндрическая стальная капсула с размещенным в ней столбом топливных таблеток, оснащенная средствами измерения температуры и давления;
- ловушка расплава, обеспечивающая защиту стенки ампулы от перегрева в случае выхода топлива за пределы стальной капсулы;
- система вентиляции ампулы, которая позволяет произвести удаление газообразных и аэрозольных продуктов деления из ампулы, а также может служить дополнительным средством, обеспечивающим расхолаживание ампулы после завершения реакторного эксперимента.

Ампульное облучательное устройство в сборе представляет собой ампулу, в которой размещена капсула с топливными таблетками. Общий вид устройства показан на рис. 1.

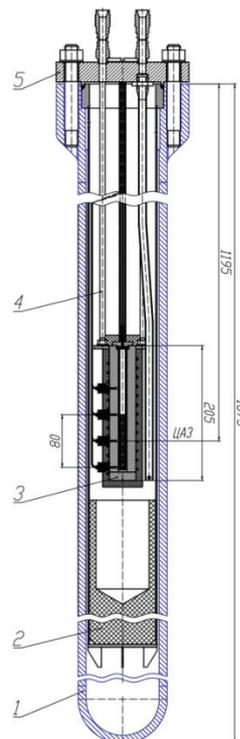


Рис. 1. Ампульное экспериментальное устройство: 1 – ампула; 2 – ловушка; 3 – стальная капсула; 4 – штанга; 5 – крышка ампулы

Fig. 1. Ampoule experimental device: 1 – ampoule; 2 – trap; 3 – steel capsule; 4 – rod; 5 – lid

Капсула с топливными таблетками представляет собой цилиндрический сосуд с толщиной стенки 13 мм, изготовленный из нержавеющей стали марки 12X18H10T, в который установлен танталовый стакан. Внутри танталового стакана размещены топливные таблетки. Характеристики топливных

таблеток типа БН-350 приведены в таблице. Для предварительного разогрева топлива до 673 К используется электрический нагреватель омического типа, изготовленный из кабеля КТМС-Н с наружным диаметром 3 мм, мощность которого может регулироваться в диапазоне от 0,1 до 1,5 кВт [20]. Нагреватель установлен на капсулу и подключен к стендовой системе электропитания через токовводы, имеющиеся в крышке ампулы.

Таблица. Технические характеристики экспериментального устройства

Table. Technical characteristics of the experimental device

Наименование/Designation	Значение/Value
Топливо Fuel	Диоксид урана UO_2 Uranium dioxide UO_2
Содержание ^{235}U в топливе ^{235}U content in fuel, %	17
Плотность, г/см ³ /Density, g/cm ³	10,3–10,8
Наружный диаметр топливной таблетки, мм Outer diameter of the fuel pellet, mm	$5,9 \pm 0,02$
Диаметр отверстия в топливной таблетке, мм Diameter of the hole in the fuel pellet, mm	$1,5 \pm 0,1$
Высота топливного столба, мм Height of the fuel pin, mm	80
Материал оболочки Material of cladding	X16H15M3Б/Cr16Ni15Mo3Nb
Наружный диаметр оболочки, мм Outer diameter of the cladding, mm	6,9
Внутренний диаметр оболочки, мм Inner diameter of the cladding, mm	6,1
Масса топлива, кг/Fuel mass, kg	0,021

Оценка теплового состояния капсулы ампульного экспериментального устройства для испытаний модельного твэла в процессе предварительного разогрева, а также в режиме разогрева и плавления топлива осуществлялась с использованием трехмерной расчетной модели, показанной на рис. 2. Электрический нагреватель в процессе предварительного разогрева моделировался внутренним энерговыделением в стальной стенке, имитирующей кабельный нагреватель, при этом толщина стенки соответствовала диаметру кабельного нагревателя.

Диаграмма изменения мощности нагревателя, которая моделировалась при проведении теплового расчета, выбиралась такой, чтобы температура и элементов капсулы, и натриевого теплоносителя достигла 673 К одновременно, а процесс плавления натрия протекал сверху вниз. Этим условиям соответствует диаграмма мощности нагревателя, представленная на рис. 3. В расчете задавалась переменная по высоте плотность энерговыделения в модели нагревателя в месте расположения капсулы. Такое распределение линейной мощности позволяет уменьшить неравномерность температурного поля по высоте капсулы.

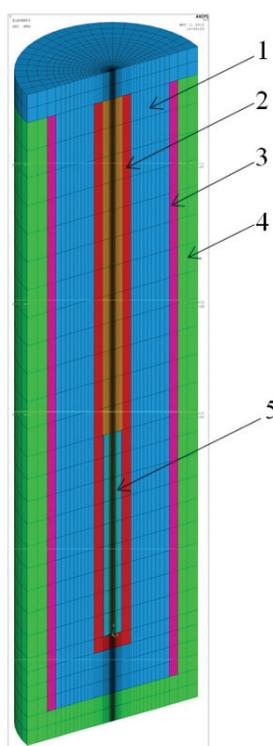


Рис. 2. Трехмерная расчетная модель капсулы экспериментального устройства: 1 – стальная капсула; 2 – танталовый стакан; 3 – нагреватель; 4 – теплоизоляция; 5 – топливо

Fig. 2. Three-dimensional design model of the capsule of the experimental device: 1 – steel capsule; 2 – tantalum sleeve; 3 – heater; 4 – thermal insulation; 5 – fuel

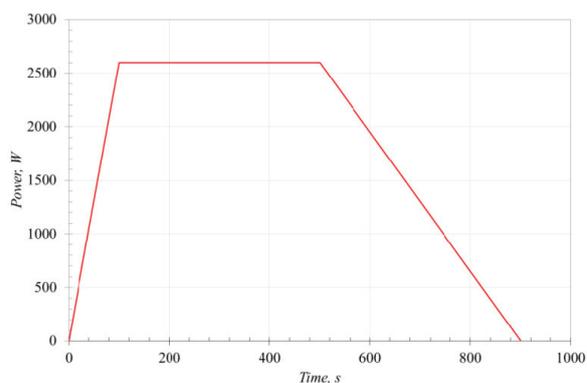


Рис. 3. Диаграмма изменения мощности электрического нагревателя при предварительном разогреве

Fig. 3. Diagram of power change of the electric heaters while pre-heating

Результаты расчета показали, что в процессе предварительного разогрева топлива температура наружного корпуса ампулы не изменится. При этом топливо и натрий, а также элементы конструкции капсулы будут разогреты до температуры ~673 К приблизительно через 15 минут после начала разогрева (рис. 4). Изменение температуры натрия в ампульном экспериментальном устройстве в процессе предварительного разогрева показано на рис. 5.

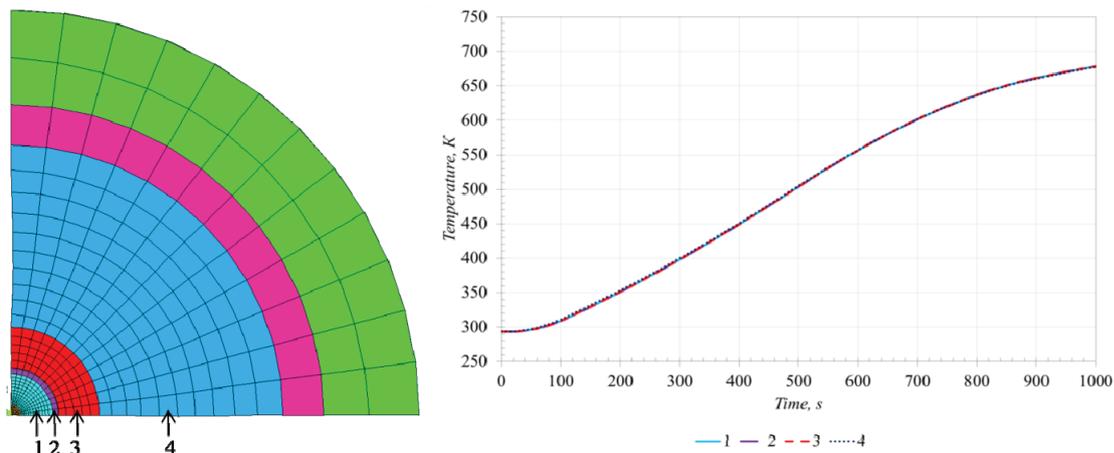


Рис. 4. Изменение температуры в контрольных точках капсулы в сечении на уровне центра активной зоны в процессе предварительного разогрева: 1 – топливо; 2 – топливная оболочка; 3 – танталовый стакан; 4 – стальной стакан

Fig. 4. Temperature change in the control points of the capsule in the cross section at the center of the core level during the preheat: 1 – fuel; 2 – fuel cladding; 3 – tantalum sleeve; 4 – steel sleeve

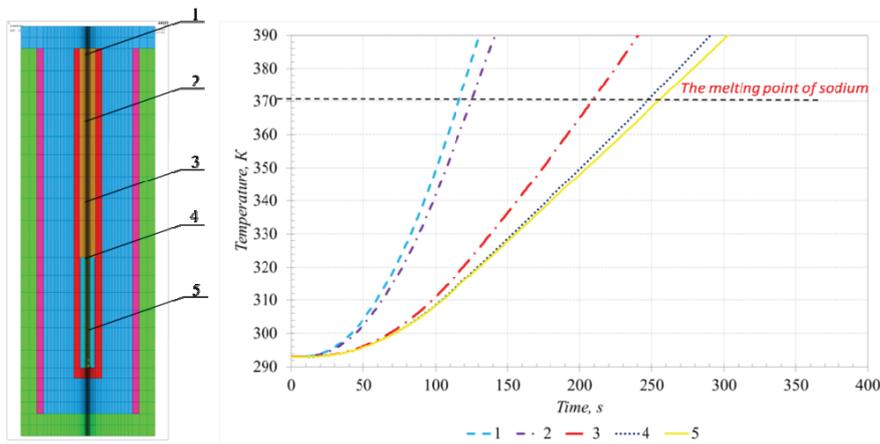


Рис. 5. Изменение температуры натрия на различных уровнях по высоте капсулы

Fig. 5. Changing sodium temperature at different levels in height capsule

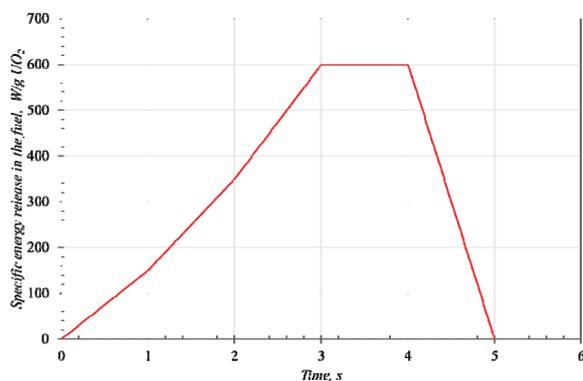


Рис. 6. Изменение мощности энерговыделения в топливе

Fig. 6. Change in the power of energy release in fuel

При оценке теплового состояния ампульного ЭУ в режиме разогрева и плавления топлива распределение температуры элементов конструкции

ЭУ, полученное в результате расчета режима предварительного разогрева, принимали в качестве начального.

Теплопередача в элементах конструкции осуществлялась за счет теплопроводности и лучистого теплообмена. Объемное распределение энерговыделения в топливе определялось по результатам проведенных нейтронно-физических расчетов и рассчитанного значения коэффициента связи между энерговыделением в топливе модельного твэла внутриреакторного экспериментального устройства и в активной зоне ИГР, которое составило $3,12 \cdot 10^{-6}$. В топливе была реализована заданная диаграмма изменения мощности энерговыделения, которая показана на рис. 6.

Из результатов расчета проведения исследований в таком режиме работы реактора следовало (рис. 7), что максимальные температуры топлива, оболочки твэла, танталового стакана и стальной капсулы на уровне центра активной зоны (ЦАЗ)

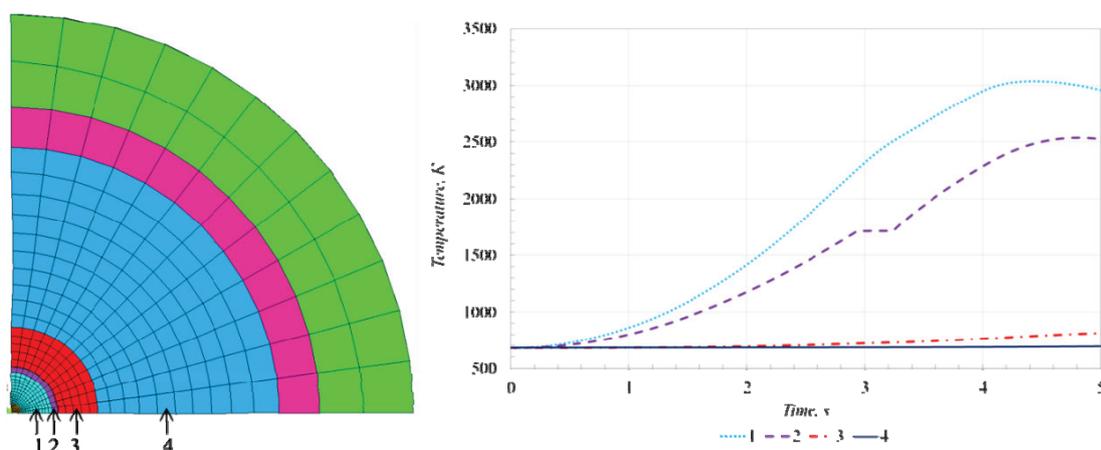


Рис. 7. Изменение температуры в контрольных точках на уровне ЦАЗ: 1 – топливо; 2 – топливная оболочка; 3 – танталовый стакан; 4 – стальной стакан

Fig. 7. Temperature change at the control points at the core center: 1 – fuel; 2 – fuel cladding; 3 – tantalum sleeve; 4 – steel sleeve

составляют соответственно ~3000, ~2500, ~806 и ~693 К. При таких значениях температуры конструкция экспериментального устройства сохранит свою целостность, тем самым будет достигнута цель эксперимента по получению кориума.

Заключение

Результаты проведенных расчетов (выполненных при принятой диаграмме энерговыделения в топливе) позволяют сделать следующие выводы:

- при реализации выбранной диаграммы изменения мощности электронагревателя в режиме предварительного разогрева плавление натрия начнется сверху и будет перемещаться вниз;
- плавление топлива начинается на четвертой секунде от начала реализации диаграммы энерговыделения в топливе;
- при плавлении топлива обеспечивается целостность танталового стакана и стальной капсулы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gordon B.G. Russia's strategy in reactors safety investigations // Atomic energy. – 2000. – V. 89. – Iss. 5. – P. 920–923.
- Ung S.K., Poong H.S. An application of dynamic safety system to pressurized water reactor // Annals of nuclear energy. – 1998. – V. 25. – Iss. 5. – P. 1221–1233.
- Novelli A. The AMEVA PWR, a new concept in the technology of nuclear reactor safety // Annals of nuclear energy. – 2000. – V. 27. – Iss. 7. – P. 589–606.
- Радиационная безопасность корпусного кипящего реактора при авариях с течью теплоносителя / А.С. Курский, В.В. Калыгин, И.И. Семидоцкий, В.И. Широков, Д.П. Протопопов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2014. – № 2. – С. 9–13.
- Study on heat removal capability of calandria vault water from molten corium in calandria vessel during severe accident of a PHWR / S.V. Prasad, A.K. Nayak, P.P. Kulkarni, P.K. Vijayan, K.K. Vaze // Nuclear Engineering and Design. – 2015. – V. 284. – P. 130–142.
- Kim T.H., Kim S.H., Chang Y. Structural assessment of reactor pressure vessel under multilayered corium formation conditions // Nuclear Engineering and Technology. – 2015. – V. 47. – Iss. 3. – P. 351–361.
- Experimental studies on the upward fuel-discharge for elimination of severe recriticality during core-disruptive accidents in sodium-cooled fast reactors / K. Kamiyama, A. Vurim, A. Kolodeshnikov, et al. // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2014. – V. 51. – Iss. 9. – P. 1114–1124.
- Мухамедов Н.Е., Витюк В.А. Анализ теплового состояния экспериментального устройства при проведении испытаний на реакторе ИГР // Вестник НЯЦ РК. – 2011. – № 3. – С. 63–66.
- Выбор и обоснование режима испытаний внутриреакторного устройства / С.А. Адилбеков, Н.Е. Мухамедов, А.В. Пахниц и др. // Ядерная и радиационная физика: Доклады X Международ. конф. – Курчатов: 2016. – С. 47–51.
- Экспериментальные исследования на реакторе ИГР в обоснование методики определения пространственного положения топлива в экспериментальных устройствах в условиях, имитирующих тяжелые аварии с разрушением и плавлением топлива / А.Д. Вурим, В.А. Гайдайчук, Ж.Р. Жотабаев и др. // Вестник НЯЦ РК. – 2010. – № 4. – С. 33–40.
- Расчет параметров модельной ТВС в экспериментах с натрием на реакторе ИГР / Б.Е. Бекмагамбетова, В.А. Витюк, Р.А. Иркимбеков, А.В. Пахниц // Вестник НЯЦ РК. – 2014. – № 3. – С. 36–39.
- Расчетно-экспериментальные исследования в поддержку программы внутриреакторных испытаний модельной ТВС перспективного реактора / А.Д. Вурим, В.А. Витюк, В.А. Гайдайчук и др. // Вестник НЯЦ РК. – 2015. – № 1. – С. 55–60.
- Examination of melted fuel rods and released core material from the first Phebus-FP reactor accident experiment / P.D.W. Bottomley, A.D. Stalios, J.-P. Glatz, B. Sätmark, C.T. Walker // Journal of Nuclear Materials. – 2000. – V. 278. – Iss. 2–3. – P. 136–148.
- Safety Strategy of JSFR Eliminating Severe Recriticality Events and Establishing In-Vessel Retention in the Core Disruptive Accident / I. Sato, Y. Tobita, K. Konishi, K. Kamiyama, J. Toyooka, R. Nakai, S. Kubo, S. Kotake, K. Koyama, Y. Vassiliev, A. Vurim, V. Zuev, A. Kolodeshnikov // Journal of nuclear science and technology. – 2011. – V. 48. – Iss. 4. – P. 556–566.
- Курчатов И.В., Фейнберг С.М., Доллежалъ Н.А. Импульсный графитовый реактор ИГР // Атомная энергия. – 1964. – Т. 17. – № 6. – С. 463–474.

16. Kotov V.M., Irkimbekov R.A., Kurpesheva A.M. Bench-Mark model of the IGR reactor // Nuclear and radiation physics: the collection of theses of 8th International conference. – Almaty: 2011. – С. 37–40.
17. MCNP/5: A General Monte Carlo N – Particle Transport Code, Version 5, 2003. URL: <https://www.nucleonica.com/wiki/images/8/89/mcnpvol1.pdf> (дата обращения: 27.07.2016).
18. ANSYS Workbench. URL: <http://cae-expert.ru/product/ansys-workbench> (дата обращения: 27.07.2016).
19. Ампульное облучательное устройство для испытаний модельных твэлов энергетического реактора: пат. Республика Казахстан № 1591; заявл. 22.06.2015; опубл. 29.07.2016, Бюл. № 8. – 129 с.
20. Альтгаузен А.Л. Электротермическое оборудование. – М.: Энергия, 1980. – 267 с.

Поступила 01.06.2017 г.

Информация об авторах

Скаков М.К., доктор физико-математических наук, профессор, академик КазНАЕН, заместитель генерального директора РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Казахстан.

Мухамедов Н.Е., PhD-докторант государственного университета имени Шакарима города Семей, Казахстан.

Дерявко И.И., кандидат технических наук, ученый секретарь Филиала «Институт атомной энергии» РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Казахстан.

UDC 621.039

ON THE ISSUE OF SUBSTANTIATION OF TEST MODES FOR AMPOULE EXPERIMENTAL DEVICE IN RESEARCH REACTOR

Mazhyn K. Skakov¹,
skakov@nnc.kz

Nurzhan E. Mukhamedov²,
mukhamedov@nnc.kz

Ilya I. Deryavko¹,
ilya@nnc.kz

¹ Institute of Atomic Energy of NNC RK,
10, Krasnoarmeiskaya Street, Kurchatov, 071100, Republic of Kazakhstan.

² State University named after Shakarim,
20a, Glinky Street, Semey, 071400, Republic of Kazakhstan.

The relevance of the research is caused by complementation of the information on severe accident of fast neutron power reactor in the result of computational-experimental researches.

The main aim of the study is to detect thermal state of steel capsule in ampoule experimental device, designed for getting material melt of fast power reactor core in the conditions modeling reactor severe accident.

Research methods: methods of computational modeling of neutron processes using MCNP5 specialized codes based on Monte-Carlo method, as well as the method of system finite-difference elemental analysis, implemented on ANSYS 14.0. computational software system.

Results. The authors have carried out neutron-physical and thermal calculations of an ampoule irradiation device designed for investigating severe accidents of fast energy reactors (this device, in which the material of the reactor core melts, is made of materials which melting points are lower than the temperature of the resulting melt of the corium). As a result of neutronic calculations the coupling coefficient between the in-core fuel assemblies energy release in the irradiation device and ampoule energy release in the core Pulse graphite reactor was defined. From the results of the thermophysical calculation it follows that during reactor tests in the selected reactor operation mode, the maximum fuel temperature at the center of the core level is 3000 K, at the fuel element cladding is 2500 K, for the tantalum glass is 806 K, for the steel capsule is 693 K. With such temperature values, the design of the experimental device will retain its integrity and thereby the safety of the experiment on obtaining the full-scale corium will be achieved.

Key words:

Ampoule device, fuel pin, severe reactor accident, corium, melt.

REFERENCES

- Gordon B.G. Russian's strategy in reactors safety investigations. *Atomic energy*, 2000, vol. 89, Iss. 5, pp. 920–923.
- Ung S.K., Poong H.S. An application of dynamic safety system to pressurized water reactor. *Annals of nuclear energy*, 1998, vol. 25, Iss. 5, pp. 1221–1233.
- Novelli A. The AMEBA PWR, a new concept in the technology of nuclear reactor safety. *Annals of nuclear energy*, 2000, vol. 27, Iss. 7, pp. 589–606.
- Kursky A.S., Kalygin V.V., Semidotsky I.I., Shirokov V.I., Protopopov D.P. Radiation safety of boiling water reactors in case of coolant leakage accidents. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2014, no. 2, pp. 9–13. In Rus.
- Prasad S.V., Nayak A.K., Kulkarni P.P., Vijayan P.K., Vaze K.K. Study on heat removal capability of calandria vault water from molten corium in calandria vessel during severe accident of a PHWR. *Nuclear Engineering and Design*, 2015, vol. 284, pp. 130–142.
- Kim T.H., Kim S.H., Chang Y. Structural assessment of reactor pressure vessel under multilayered corium formation conditions. *Nuclear Engineering and Technology*, 2015, vol. 47, Iss. 3, pp. 351–361.
- Kamiyama K., Vurim A., Kolodeshnikov A. Experimental studies on the upward fuel-discharge for elimination of severe recriticality during core-disruptive accidents in sodium-cooled fast reactors. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2014, vol. 51, Iss. 9, pp. 1114–1124.
- Mukhamedov N.E., Vityuk V.A. Analysis of the thermal state of the experimental device during testing at the reactor IGR. *NNC RK Bulletin*, 2011, no. 3, pp. 63–66. In Rus.
- Adilbekov S.A., Mukhamedov N.E., Pakhnits A.V. i dr. Vybór i obosnovanie rezhima ispytanií vnutrireaktornogo ustroystva [Selection and justification of the test mode of the in-reactor device]. *Doklady X Mezhdunarodnoy konferentsii. Yadernaya i radiatsionnaya fizika* [Proc. 10th Int. Conf. Nuclear and radiation physics]. Kurchatov, 2016, pp. 47–51.
- Vurim A.D., Gaidaichuk V.A., Zhotabaev Zh.R. Experimental investigations at the IGR reactor to substantiate methodology of determining the spatial position in experimental device simulating severe accidents with fuel melting and destruction. *NNC RK Bulletin*, 2010, no. 4, pp. 33–40. In Rus.
- Bekmagambetova B.E., Vityuk V.A., Irkimbekov R.A., Pakhnits A.V. Calculation of parameters of the simulative FA in experiments with sodium at the IGR reactor. *NNC RK Bulletin*, 2014, no. 3, pp. 36–39. In Rus.
- Vurim A.D., Vityuk V.A., Gaidaichuk V.A. Computational and experimental study in support of in-pile test program for model FA of advanced reactor. *NNC RK Bulletin*, 2015, no 1, pp. 55–60. In Rus.
- Bottomley P.D.W., Stalios A.D., Glatz J.-P., Sätmark B., Walker C.T. Examination of melted fuel rods and released core material from the first Phebus-FP reactor accident experiment. *Journal of Nuclear Materials*, 2000, vol. 278, Iss. 2–3, pp. 136–148.
- Sato I., Tobita Y., Konishi K., Kamiyama K., Toyooka J., Nakai R., Kubo S., Kotake S., Koyama K., Vassiliev Y., Vurim A.,

- Zuev V., Kolodeshnikov A. Safety Strategy of JSFR Eliminating Severe Recriticality Events and Establishing In-Vessel Retention in the Core Disruptive Accident. *Journal of nuclear science and technology*, 2011, vol. 48, Iss. 4, pp. 556–566.
15. Kurchatov I.V., Feinberg S.M., Dollezhal N.A. Impulsny grafitovy reaktor IGR [Pulsed Graphite IGR reactor]. *Atomic energy*, 1964, vol. 17, no. 6, pp. 463–474.
 16. Kotov V.M., Irkimbekov R.A., Kurpesheva A.M. Bench-Mark model of the IGR reactor. *The collection of theses of 8th International conference «Nuclear and radiation physics»*. Almaty, 2011. pp. 37–40.
 17. MCNP/5: A General Monte Carlo N – Particle Transport Code, Version 5, 2003. Available at: <https://www.nucleonica.com/wiki/images/8/89/mcnpvoli.pdf> (accessed 27 July 2016).
 18. ANSYS Workbench. Available at: <http://cae-expert.ru/product/ansys-workbench> (accessed 27 July 2016).
 19. Skakov M.K., Vurim A.D., Mukhamedov N.E., Pakhnits A.V., Khametov S.Z., Deryavko I.I. *Ampulnoe obluchatelnoe ustroystvo dlya ispytaniy modelnykh tvelov energeticheskogo reaktora* [Ampoule irradiation device for testing model fuel rods of the power reactor]. Patent RK, no. 1591, 2016.
 20. Altgauzen A.L. *Elektrotermicheskoe oborudovanie* [Electrothermal equipment]. Moscow, Energiya Publ., 1980. 267 p.

Received: 1 June 2017.

Information about the authors

Mazhyn K. Skakov, Dr. Sc., professor, Institute of Atomic Energy of NNC RK.

Nurzhan E. Mukhamedov, PhD student, State University named after Shakarim.

Ilya I. Deryavko, Cand. Sc., academic secretary, Institute of Atomic Energy of NNC RK.

УДК 665.613+617:550.84

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ НЕФТИ КРАПИВИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СООБЩЕНИЕ 3)

Сергун Валерий Петрович¹,
sergun@ipc.tsc.ru

Чешкова Татьяна Викторовна¹,
chvtv12@mail.ru

Сагаченко Татьяна Анатольевна¹,
dissovet@ipc.tsc.ru

Мин Раиса Сергеевна¹,
lgosn@ipc.tsc.ru

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

Актуальность работы обусловлена необходимостью получения информации о составе и строении асфальтеновых компонентов метанофтеновой нефти месторождения Крапивинское из верхнеюрских отложений на территории Томской области для решения проблем, связанных с ее добычей, транспортом и переработкой.

Цель работы: охарактеризовать состав асфальтенов нефти Крапивинского месторождения и структурных фрагментов, связанных в их молекулах через сульфидные и эфирные мостики.

Методы исследования: экстракция, жидкостно-адсорбционная хроматография, селективная химическая деструкция сульфидных и эфирных связей, ИК спектроскопия, хроматомасс-спектрометрия.

Результаты. Установлено, что в составе асфальтенов метанофтеновой нефти присутствуют высоко- и низкомолекулярные компоненты и соединения, адсорбированные или окклюдированные их молекулами («мальтены»). В структуру асфальтенов входят фрагменты, связанные между собой или с ядром молекул асфальтеновых веществ эфирными и сульфидными группами. Основными представителями таких фрагментов являются нормальные и разветвленные алканы, алкены с четным числом атомов углерода в цепи, моно- и полициклоалканы, моно-, би-, три-, тетра- и пентациклические ароматические углеводороды, дибензотиофены и жирные кислоты. Среди соединений, адсорбированных/окклюдированных макромолекулами исследуемых асфальтеновых компонентов, установлены нормальные и разветвленные алканы, алкены с четным числом атомов углерода в цепи, алкилциклопентаны и алкилциклогексаны, стераны и терпаны, моно-, би- и тризамещенные алкилбензолы, нафталины, фенантроны, бензо- и дибензотиофены, дибензофураны, бензо- и дибензокарбазолы. Присутствие идентифицированных соединений в составе «мальтенов» может быть обусловлено как их сорбцией на макромолекулярных образованиях асфальтенов, так и клатрацией с наноагрегатами асфальтенов, захватившими эти соединения в полые ячейки своих структур на ранних стадиях формирования нефтяных систем.

Ключевые слова:

Высоко- и низкомолекулярные асфальтены, «мальтены», селективная химическая деструкция, структурные фрагменты, состав, насыщенные и ароматические углеводороды, гетероорганические соединения.

Введение

Предлагаемая работа является продолжением исследований [1, 2] метанофтеновой нефти месторождения Крапивинское (Томская область, оцениваемые запасы 36,5 млн тонн, активно эксплуатируется с 2010 г). В предыдущих сообщениях приведены физико-химические характеристики нефти, рассчитаны важнейшие структурные параметры молекул смолисто-асфальтеновых веществ, определен состав насыщенных и ароматических углеводородов (УВ) и гетероорганических соединений масляных компонентов. В настоящей работе внимание уделено изучению асфальтеновых компонентов крапивинской нефти. Интерес к характеристике этих высокомолекулярных соединений обусловлен главным образом тем, что качественный состав асфальтенов в значительной степени определяет поведение нефтяных дисперсных систем (НДС) при их добыче, транспортировке и переработке. Асфальтены играют существенную роль в образовании твердых отложений, способ-

ных закупоривать скважины, трубопроводы, наземное оборудование и поры вмещающих коллекторов [3–5], влияют на устойчивость нефтяных эмульсий и эффективность катализаторов процессов нефтепереработки [6–8]. Исследование асфальтеновых веществ представляет собой достаточно трудную задачу, так как асфальтены являются наиболее сложными по строению компонентами НДС, представляющими собой непрерывный ряд соединений с различной молекулярной массой, полярностью и растворимостью [9–12]. В отличие от остальных компонентов нефти, асфальтены более склонны к образованию молекулярных ассоциатов в виде коллоидных частиц значительных размеров. В составе таких частиц собственно асфальтеновые молекулы образуют ядра, на поверхности которых адсорбируются молекулы гетероатомных и углеводородных компонентов нефтяных дистиллятов [13]. В последнее время для характеристики химической природы асфальтенов широко используют методы экстракции и селективной химиче-

ской деструкции [14–17], позволяющие разделить асфальтеновые компоненты по молекулярной массе и установить детали «строительных блоков», участвующих в формировании макромолекул асфальтенов. В частности, получить информацию о наличии и составе структурных фрагментов, связанных между собой или с поликонденсированным ядром макромолекул асфальтенов эфирными и сульфидными мостиками.

Цель работы – получение данных о фракционном составе асфальтенов нефти Крапивинского месторождения и составе структурных фрагментов, связанных в их молекулах сульфидными и эфирными группами.

Экспериментальная часть

Исходные асфальтены (содержание в нефти 2,6 % мас.) осаждали по стандартной методике 40-кратным количеством петролейного эфира с температурой кипения 40–70 °С. Основу исследования их состава составила схема [18], предусматривающая разделение асфальтеновых веществ экстракцией горячим ацетоном на экстракт и высокомолекулярные компоненты, обработку экстракта гексаном с получением растворимых («мальтены») и нерастворимых (низкомолекулярные асфальтены) продуктов, хроматографическое разделение «мальтенов» на фракции относительно малополярных и полярных соединений, элюируемых смесями гексана с бензолом (1:1 по объему, фракция А) и метанола с хлороформом (1:4 по объему, фракция В).

Для разрушения эфирных и сульфидных мостиков использовали трибромид бора и борид никеля [19]. Жидкие продукты селективных реакций разделяли на силикагеле АСК (100/160) на неполярную и полярную фракции, применяя для десорбции алкилбромидов смеси н-гексана и бензола (7:3 по объему) и спирта и бензола (1:1 по объему), а для десорбции растворимых продуктов деструкции – смеси н-гексана и бензола (1:1 по объему) и метанола и хлороформа (1:4 по объему). Алкилбромиды неполярной фракции восстанавливали алюмогидридом лития.

Продукты восстановления алкилбромидов, неполярную фракцию, содержащую продукты деструкции, и фракцию А «мальтенов» анализировали методом хроматомасс-спектрометрии (ГХ-МС).

Состав фракции В охарактеризован методом ИК спектроскопии.

Хроматомасс-спектры получали на DFS приборе фирмы Thermo Scientific. Условия получения спектров, их обработки и подходы к идентификации соединений приведены в работе [20].

ИК спектры в области 4000–400 см⁻¹ регистрировали на FT-IR спектрометре Nicolet 5700 Томского регионального центра коллективного пользования ТНЦ СО РАН.

Результаты и их обсуждение

Анализ результатов фракционирования асфальтенов крапивинской нефти показал, что характер распределения их соединений по молекулярной массе типичен для асфальтеновых компонентов НДС [21, 22]. Основной вклад в состав исследуемых асфальтенов вносят высокомолекулярные асфальтены (ВМА, 87,9 % отн.). На долю низкомолекулярных асфальтенов (НМА) и «мальтенов» приходится лишь 5,4 и 6,7 % отн.

Химическая деструкция сульфидных связей в молекулах высоко- и низкомолекулярных асфальтенов нефти месторождения Крапивинское

Выход растворимых в гексане продуктов деструкции молекул ВМА крапивинской нефти существенно ниже (24,1 %), чем выход растворимых продуктов деструкции сульфидных связей в молекулах ее НМА (46,3 %). Аналогичный характер распределения растворимых продуктов хемолиза был установлен для асфальтеновых компонентов тяжелой нефти месторождения Усинское [23] и может свидетельствовать о большем количестве «серосвязанных» соединений в структуре низкомолекулярных асфальтенов НДС.

По данным ГХ-МС анализа, в составе растворимых продуктов химической деструкции сульфидных связей в молекулах асфальтенов обеих фракций присутствуют алканы, алкены, моно- и полициклоалканы, моно- и полициклические ароматические углеводороды (АУ) и гетероорганические соединения.

«Серосвязанные» алканы в молекулах ВМА представлены нормальными алканами C₁₄–C₃₅, монометилзамещенными алканами C₁₄–C₃₂, изопреноидными алканами C₁₉ и C₂₀ и 1-алкенами от C₁₆ до C₃₄ с четным числом атомов углерода в молекуле (рис. 1).

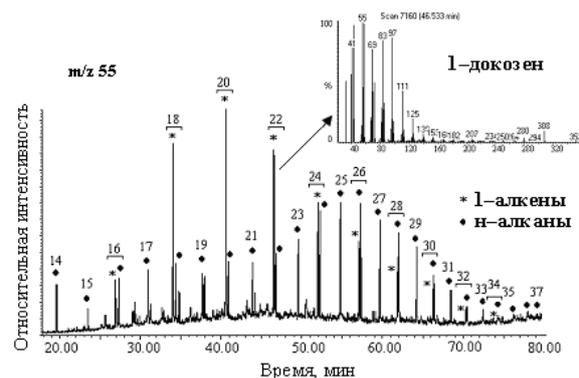


Рис. 1. Распределение 1-алкенов в продуктах деструкции сульфидных связей в молекулах высокомолекулярных асфальтенов при сканировании по иону m/z 55 и масс-спектр 1-докозена. Здесь и далее цифрами обозначено число атомов углерода в молекуле

Fig. 1. Distribution of 1-alkenes in the products of sulfide bonds destruction in molecules of high molecular asphaltenes at scanning on the ion m/z 55 and mass spectra of 1-docosene. Hereinafter the numbers denote the amount of carbon atoms in the molecule

В составе моноциклических нафтенов идентифицированы алкилциклопентаны C_{15} – C_{24} (m/z 68, 69) и алкилциклогексаны C_{17} – C_{21} (m/z 82, 83), в составе полициклических нафтенов – терпаны (m/z 191), среди которых установлены хейлантаны состава C_{23} , ряд предельных гопанов от C_{27} до C_{33} и непредельные гопаны состава C_{30} (рис. 2, 3). Наличие углеводородов-биомаркеров в жидком продукте десульфуризации ВМА отмечено нами и в аналогичном продукте хемолиза ВМА тяжелой усинской нефти [23]. По данным авторов [18, 19], их связь с ядром молекул асфальтенов может осуществляться как через один, так и через два атома серы.

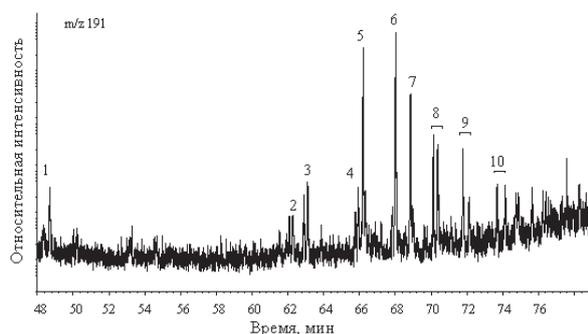


Рис. 2. Масс-хроматограмма терпановых углеводородов по иону m/z 191 продуктов деструкции сульфидных связей в молекулах высокомолекулярных асфальтенов (1 – C_{23} трициклический терпан; 2, 3 – C_{27} триснорнеогопаны; 5 – C_{29} норгопан; 6 – C_{30} гопан; 4, 7 – C_{30} гопены; 8–10 – C_{31} – C_{33} гопаны)

Fig. 2. Mass-chromatogram of terpane hydrocarbons for ion m/z 191 for the products of sulfide bonds destruction in molecules of high-molecular asphaltenes (1 – C_{23} tricyclic terpane; 2, 3 – C_{27} trisnorneohopanes; 5 – C_{29} norhopane; 6 – C_{30} hopane; 4, 7 – C_{30} hopenes and 8–10 – C_{31} hopanes)

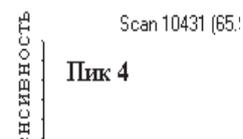


Рис. 3. Масс-спектры терпановых углеводородов с ионом m/z 410 (номера пиков соответствуют таковым на рис. 2)

Fig. 3. Mass spectra of terpane hydrocarbons with an ion m/z 410 (the peak numbers correspond to those in Fig. 2)

Моноарены в продукте десульфуризации ВМА представлены C_{15} – C_{32} *n*-алкилбензолами (m/z 92), C_{15} – C_{23} алкилтолуолами (m/z 105) и C_{15} – C_{21} алкилтриметилбензолами (m/z 133). В составе полициклических АУ установлены C_0 – C_2 бифенилы (m/z 154...182), C_2 – C_5 нафталины (m/z 156...196), C_0 – C_3 флуорены (m/z 166...194), C_0 – C_1 антрацены (m/z 178, 192), C_0 – C_4 фенантрены (m/z 178...234), C_0 – C_2 флуорантены, пирены (m/z 202...230), C_0 – C_2 трифенилены, хризены (m/z 228...256), C_0 – C_2 перилены, бензофлуорантены, бензо [a] пирены (m/z 252...270), C_0 – C_2 бензо [g, h, i] перилены, дибензохризены (m/z 276...304) и C_0 – C_1 дибен-

зопирены (m/z 302, 316). Среди гетероорганических соединений идентифицирован дибензотиофен (m/z 184), его C_1 – C_3 -алкилпроизводные (m/z 198...226) и ряд метиловых эфиров алифатических кислот от C_{15} до C_{19} (m/z 74).

Анализ растворимого продукта десульфуризации НМА показал, что через сульфидные мостики в структуре их молекул связаны нормальные и монометилзамещенные алканы, 1-алкены, алкилциклопентаны, алкилциклогексаны, моно-, би- и трициклические АУ и жирные кислоты, распределение которых практически совпадает с распределением этих соединений в продукте десульфуризации ВМА, а также незамещенный дибензотиофен, 2-алкены C_{14} – C_{22} с четным числом атомов углерода в молекуле, стераны (m/z 217), представленные прегнанами C_{21} , C_{22} , диастеранами от C_{27} до C_{28} и стеранами от C_{27} до C_{29} , и терпаны состава C_{23} – C_{24} , C_{27} , C_{29} – C_{35} .

Химическая деструкция эфирных связей в молекулах высоко- и низкомолекулярных асфальтенов нефти месторождения Крапивинское

Выход растворимых продуктов, образующихся при разрушении эфирных связей в молекулах ВМА и НМА крапивинской нефти, ниже (12,8 и 33,6 %) выхода растворимых продуктов десульфуризации обеих фракций асфальтенов (24,1 и 46,3 %). Это указывает на то, что наиболее существенный вклад в структуру асфальтенов метано-нафтеновой нефти вносят фрагменты, содержащие сульфидные связи. В то же время более высокий выход продукта хемолиза НМА по сравнению с выходом аналогичного продукта для ВМА свидетельствует о большем количестве «эфировсвязанных» соединений в составе их молекул. По данным ГХ-МС анализа в молекулах асфальтенов обеих фракций через эфирные мостики связаны *n*-алканы C_{14} – C_{37} , терпаны C_{27} – C_{34} и стераны C_{27} – C_{29} . В составе продуктов хемолиза ВМА дополнительно присутствуют алкилциклопентаны C_{17} – C_{26} , алкилциклогексаны C_{17} – C_{25} , алкилбензолы C_{18} – C_{30} и алкилтолуолы C_{18} – C_{29} , а в составе продуктов хемолиза НМА – монометилзамещенные алканы C_{16} – C_{32} , изопреноиды C_{18} – C_{20} и алифатические спирты (m/z 55) состава C_{14} , C_{16} . Хотя набор соединений, идентифицированных в продуктах разрушения эфирных мостиков в структуре исследуемых асфальтенов, существенно уже набора фрагментов, установленных в продуктах их десульфуризации, следует отметить, что по молекулярно-массовому распределению все идентифицированные «эфировсвязанные» фрагменты практически идентичны одноименным «серосвязанным» структурам.

Состав «мальтенов»

Согласно результатам хроматографического разделения, большую часть «мальтенов» асфальтеновых компонентов крапивинской нефти (60,6 %) составляют полярные соединения фракции В. По данным качественной ИК спектроско-

пии, часть этих соединений представлена структурами, содержащими функциональные группы кислот ($3300...3100$, 1727 , $1709...1700$ см^{-1}), амидов ($1700...1600$ см^{-1}) и сульфоксидов ($1040...1010$ см^{-1}). Наличие кислот и сульфоксидов в полярных продуктах фракционирования «мальтенов» отмечено в [17–19].

ГХ-МС анализ фракции А (39,4 %) показал, что малополярные соединения исследуемых «мальтенов» – это сложная смесь насыщенных и ароматических УВ и гетероатомных компонентов. В составе насыщенных УВ присутствуют н-алканы $\text{C}_{14}\text{--}\text{C}_{32}$, монометилалканы $\text{C}_{16}\text{--}\text{C}_{32}$ с различным положением замещающего радикала, 2,6,10-триметил- и 2,6,10,14-тетраметилалканы состава $\text{C}_{15}\text{--}\text{C}_{28}$, 1- и 2-алкены от C_{14} до C_{22} с четным числом атомов углерода в молекуле (рис. 4), алкилциклопентаны $\text{C}_{14}\text{--}\text{C}_{24}$, алкилциклогексаны $\text{C}_{14}\text{--}\text{C}_{28}$, прегнаны $\text{C}_{21}\text{--}\text{C}_{22}$, диахолестаны $\text{C}_{27}\text{--}\text{C}_{28}$, холестаны $\text{C}_{27}\text{--}\text{C}_{30}$, хейлантаны $\text{C}_{23}\text{--}\text{C}_{24}$, тетрациклический терпан состава C_{24} и гопаны состава C_{27} , $\text{C}_{29}\text{--}\text{C}_{35}$.

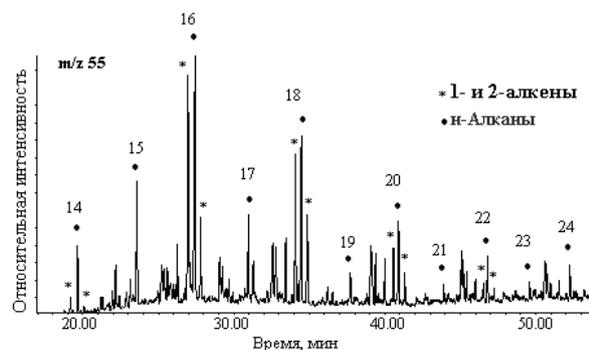


Рис. 4. Распределение 1- и 2-алкенов в «мальтенах» при сканировании по иону m/z 55

Fig. 4. Distribution of 1- and 2-alkenes in «maltens» at scanning for ion m/z 55

АУ представлены моно-, би- и трициклическими структурами. Среди моноаренов присутствуют моно-, би- и тризамещенные алкилбензолы, в составе которых идентифицированы н-алкилбензолы от C_{14} до C_{28} , н-алкилтолуолы от C_{15} до C_{28} и н-алкилсилолы от C_{16} до C_{28} . Реконструкция массфрагментограмм по характеристическим ионам с m/z 92, 106 и 120 свидетельствует о присутствии в составе бензолов фитанил- и метилфитанилбензолов. Среди бициклических АУ установлены нафталины $\text{C}_1\text{--}\text{C}_5$ (m/z 142...198), среди трициклических АУ – ряд фенантронов от C_0 до C_2 (m/z 178 ...206).

В составе гетероатомных компонентов идентифицированы $\text{C}_3\text{--}\text{C}_5$ бензотиофены (m/z 176...204), $\text{C}_0\text{--}\text{C}_3$ дибензотиофены (m/z 184...226), $\text{C}_0\text{--}\text{C}_2$ дибензофураны (m/z 168...196), $\text{C}_0\text{--}\text{C}_4$ бензокарбазолы (m/z 217...273) и $\text{C}_0\text{--}\text{C}_2$ дибензокарбазолы (m/z 267...295).

Результаты сравнительного анализа показывают, что часть идентифицированных в «мальтенах» соединений, главным образом алканы, алкены, нафтены, моно- и полициклические АУ, входит

также в структуру молекул низко- и высокомолекулярных асфальтенов, имеет сходное с ними молекулярно-массовое распределение, но различается по характеру концентрационного распределения. В качестве примера на рис. 5 приведено распределение н-алканов, установленных в составе «мальтенов» (а) и «серосвязанных» фрагментов в структуре молекул низко- (б) и высокомолекулярных (с) асфальтенов.

Заключение

Таким образом, проведенное исследование показало, что в составе асфальтенов метаноафтеновой нефти Крапивинского месторождения присутствуют высоко- и низкомолекулярные компоненты и соединения, адсорбированные или окклюдируемые их молекулами. Установлено, что часть структурных фрагментов связана в молекулах высоко- и низкомолекулярных асфальтенов эфирными и сульфидными группами. Представителями «серосвязанных» и «эфиросвязанных» фрагментов являются нормальные и разветвленные алканы, алкены с четным числом атомов углерода в цепи, моно- и полициклоалканы, моно-, би-, три-, тетра- и пентациклические АУ, дибензотиофены и жирные кислоты. Связь алканов, циклоалканов, большей части моноароматических УВ и гетероатомных компонентов осуществляется как через эфирные, так и через сульфидные мостики, а связь полициклических АУ – только через сульфидные. Следует отметить, что по характеру распределения идентифицированных соединений продукты хемоллиза обеих фракций асфальтенов различаются незначительно. Наиболее существенный вклад в структуру асфальтенов метаноафтеновой нефти вносят «серосвязанные» фрагменты.

Среди соединений, адсорбированных/окклюдируемых макромолекулами исследуемых асфальтеновых компонентов, установлены нормальные и разветвленные алканы, алкены с четным числом атомов углерода в цепи, алкилциклопентаны и алкилциклогексаны, стераны и терпаны, моно-, би- и тризамещенные алкилбензолы, нафталины, фенантроны, бензо- и дибензотиофены, дибензофураны, бензо- и дибензокарбазолы. Часть этих соединений, главным образом алканы, алкены, нафтены, моно- и полициклические АУ, имеет сходное молекулярно-массовое распределение с одноименными соединениями высоко- и низкомолекулярных асфальтенов, но отличается от них по характеру концентрационного распределения. Присутствие идентифицированных соединений в составе «мальтенов» может быть обусловлено как их сорбцией на макромолекулярных образованиях асфальтенов, так и клатрацией с наноагрегатами асфальтенов, захватившими эти соединения в полые ячейки своих структур на ранних стадиях формирования нефтяных систем.

Полученные результаты имеют значение для углубления представлений о составе и структуре асфальтеновых молекул и установления механиз-

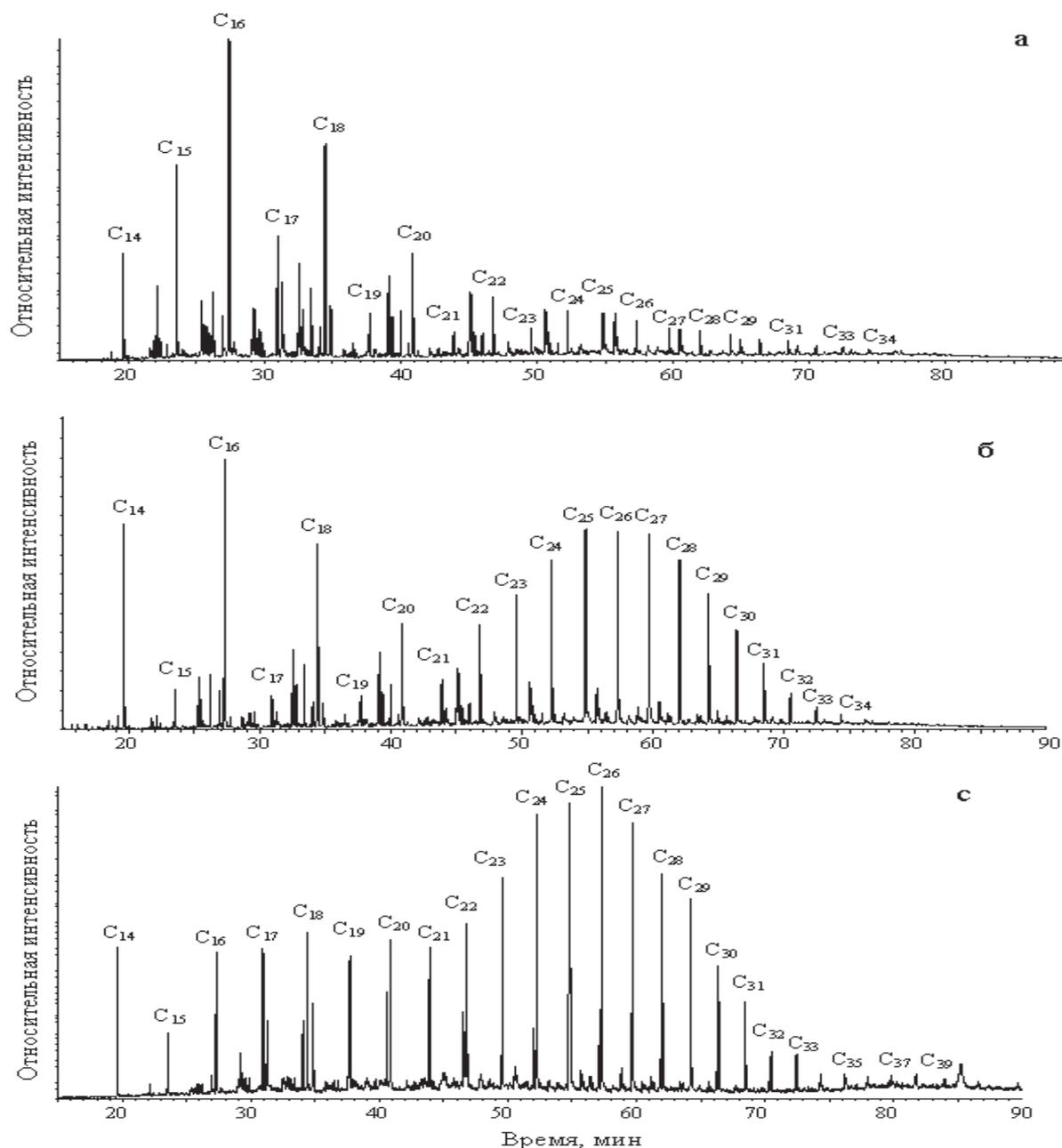


Рис. 5. Распределение *n*-алканов в «мальтенах» (а) и составе «серосвязанных» фрагментов низко- (б) и высокомолекулярных (с) асфальтенов при сканировании по иону m/z 71

Fig. 5. Distribution of *n*-alkanes in «maltenes» (a), low- (b) and high molecular (c) asphaltenes at scanning for ion m/z 71

ма образования гетероатомных компонентов нефти и формирования надмолекулярных структур в НДС, что, с одной стороны, является ключом к палеорекострукции условий осадконакопления, а с

другой – позволит предупреждать негативное влияние асфальтеновых веществ на процессы добычи, транспортировки и переработки углеводородного сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Химический состав нефти Крапивинского месторождения / А.Э. Торломоева, Т.В. Чешкова, Е.Ю. Коваленко, Т.А. Сагаченко // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 2. – С. 48–53.
2. Химический состав нефти Крапивинского месторождения (сообщение 2) / Е.Ю. Коваленко, С.С. Яновская, Р.С. Мин, Т.А. Сагаченко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 5. – С. 116–123.
3. Buckley J.S., Wang J. Crude oil and asphaltene characterization for prediction of wetting alteration // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2002. – V. 33. – № 1–3. – P. 195–202.
4. Asphaltenes – problematic but rich in potential (review) / K. Akbarzadeh, A. Hammami, A. Kharrat, D. Zhang, S. Allenson, J. Creek, S. Kabir, A. Jamaluddin, A.G. Marshall, R.P. Rodgers, O.C. Mullins, T. Solbakken // Oilfield Review. – 2007. – V. 19. – № 2. – P. 22–43.
5. Laser-Based Mass Spectroscopic assessment of asphaltene molecular weight, molecular architecture and nanoaggregate weight / A.E. Pomerantz, Q. Wu, O.C. Mullins, R.N. Zare // Energy Fuels. – 2016. – V. 29. – № 5. – P. 2833–2842.
6. Зависимость состава асфальтосмолопарафиновых отложений от степени обводненности нефти / Е.В. Кирбижекова, И.В. Прозорова, Н.А. Небогина, А.А. Гринько, Н.В. Юдина // Нефтехимия. – 2016. – Т. 56. – № 5. – С. 539–544.
7. Структурные превращения асфальтенов в процессе гидроконверсии гудрона с рециркуляцией остатка дистилляции гидрогенизата (рисайкла) / Х.М. Кадиев, О.В. Зайцева, Э.Э. Магомедов, Е.А. Чернышева, Н.В. Окнина, А.Е. Багов, М.Х. Кадиева, В.М. Капустин, С.Н. Хаджиев // Нефтехимия. – 2015. – Т. 55. – № 4. – С. 337–346.
8. Перераспределение фракций асфальтенов в процессе термолитиза остаточного нефтяного сырья / Б.П. Туманян, С.А. Синицин, Н.Н. Петрухина, А.В. Припахайло // Технология нефти и газа. – 2014. – № 2. – С. 29–35.
9. Evdokimov I.N., Fesan A.A., Losev A.P. New Answers to the Optical Interrogation of Asphaltenes: Monomers and Primary Aggregates from Steady-State Fluorescence Studies // Energy Fuels. – 2016. – V. 30. – № 6. – P. 4494–4503.
10. Grinrko A.A., Golovko A.K. Thermolysis of petroleum asphaltenes and their fractions // Petroleum Chemistry. – 2014. – V. 54. – № 1. – P. 42–47.
11. Toward the Asphaltene Structure by Electron Paramagnetic Resonance Relaxation Studies at High Fields (3.4 T) / G.V. Mamin, M.R. Gafurov, R.V. Yusupov, I.N. Gracheva, Yu.M. Ganeeva, T.N. Yusupova, S.B. Orlinkii // Energy Fuels. – 2016. – V. 30. – № 9. – P. 6942–6946.
12. Advances in asphaltene science and the Yen-Mullins model / O.C. Mullins, H. Sabbah, J. Eyssautier, A.E. Pomerantz, L. Barré, A.B. Andrews, Y. Ruiz-Morales, F. Mostowfi, R. McFarlane, L. Goual, R. Lepkovicz, T. Cooper, J. Orbulescu, R.M. Leblanc, J. Edwards, R.N. Zare // Energy and Fuels. – 2012. – V. 26. – № 7. – P. 3986–4003.
13. Antipenko V.R., Grinrko A.A., Melenevskii V.N. Composition of products of analytical pyrolysis of resin and asphaltene fractions of USA oil // Petroleum Chemistry. – 2014. – V. 54. – № 3. – P. 178–186.
14. A critique of asphaltene fluorescence decay and depolarization-based claims about molecular weight and molecular architecture / O.P. Shrausz, I. Safarik, E.M. Lown, A. Morales-Izquierdo // Energy and Fuels. – 2008. – V. 22. – № 2. – P. 1156–1166.
15. The organic geochemistry of asphaltenes and occluded biomarkers / L.R. Snowdon, J.K. Volkman, Z. Zhang, G. Tao, P. Liu // Organic Geochemistry. – 2016. – V. 91. – P. 3–15.
16. Особенности углеводородного состава асфальтитов Спиридонского месторождения (Татарстан) и природного битума озера «Пич-Лейк» (Тринидад и Тобаго) / Г.П. Каюкова, Б.В. Успенский, И.М. Абдрафикова, Р.З. Мусин // Нефтехимия. – 2016. – Т. 56. – № 4. – С. 337–345.
17. Thermal Evolution of Adsorbed/Occluded Hydrocarbons inside Kerogens and its Significance as Exemplified by One Low-Matured Kerogen from Santanghu Basin, Northwest China / B. Cheng, J. Du, Y. Tian, H. Liu, Z. Liao // Energy Fuels. – 2016. – V. 30. – № 6. – P. 4529–4536.
18. Molecular structure of Athabasca asphaltene: sulfide, ether, and ester linkages / P. Peng, A. Morales-Izquierdo, A. Hogg, O.P. Strausz // Energy and Fuels. – 1997. – V. 11. – № 5. – P. 1171–1187.
19. Chemical structure and biomarker content of Jinghan asphaltenes and kerogens / P. Peng, A. Morales-Izquierdo, E.M. Lown, O.P. Strausz // Energy and Fuels. – 1999. – V. 13. – № 1. – P. 248–265.
20. Состав низкомолекулярных соединений асфальтенов тяжелой нефти месторождения Усинское / В.П. Сергун, Е.Ю. Коваленко, Т.А. Сагаченко, Р.С. Мин // Нефтехимия. – 2014. – Т. 54. – № 2. – С. 1–5.
21. Химическая природа масляных и смолисто-асфальтеновых компонентов природного битума Ашальчинского месторождения Татарстана / Т.А. Сагаченко, В.П. Сергун, Т.В. Чешкова, Е.Ю. Коваленко, Р.С. Мин // Химия твердого топлива. – 2015. – № 6. – С. 12–18.
22. Особенности структуры макромолекул асфальтенов тяжелой нефти Усинского месторождения / Е.Ю. Коваленко, В.П. Сергун, Р.С. Мин, Т.А. Сагаченко // Химия и технология топлив и масел. – 2013. – № 6. – С. 40–44.
23. Структурные фрагменты, содержащие сульфидные и эфирные связи в молекулах высоко- и низкомолекулярных асфальтенов тяжелой нефти месторождения Усинское / В.П. Сергун, Т.В. Чешкова, Т.А. Сагаченко, Р.С. Мин // Нефтехимия. – 2016. – Т. 56. – № 1. – С. 13–18.

Поступила 25.05.2017 г.

Информация об авторах

Сергун В.П., кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории гетероорганических соединений нефти Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

Чешкова Т.В., кандидат химических наук, младший научный сотрудник лаборатории гетероорганических соединений нефти Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

Сагаченко Т.А., доктор химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории гетероорганических соединений нефти Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

Мин Р.С., доктор химических наук, заведующая лабораторией гетероорганических соединений нефти Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

UDC 665.613+617:550.84

CHEMICAL COMPOSITION OF PETROLEUM FROM KRAPIVINSKOYE OILFIELD (MESSAGE 3)

Valeriy P. Sergyn¹,
sergyn12@ipc.tsc.ru

Tatyana V. Cheshkova¹,
chvtv12@mail.ru

Tatyana A. Sagachenko¹,
dissovet@ipc.tsc.ru

Raisa S. Min¹,
lgosn@ipc.tsc.ru

¹ Institute of petroleum chemistry Siberian branch Russian academy of science,
4, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634055, Russia.

Relevance of the research is caused by the need in information on the composition and structure of the asphaltene components in the Upper Jurassic methanonaphthenic oil from the Krapivinsk oilfield located in Tomsk region to solve the problems related to oil production, transportation and processing.

The aim of the work is to characterize the composition of asphaltenes in the Krapivinsk oil and structural fragments bound in their molecules through sulfide and ether bridges.

Research methods: extraction, liquid-adsorption chromatography, selective chemical destruction of sulfide and ether bonds, IR spectroscopy, chromatography-mass spectrometry.

Results. It was ascertained that asphaltenes of methanonaphthene oil contain high- and low-molecular components and compounds adsorbed or occluded by their molecules («maltenes»). The structure of asphaltenes includes the fragments connected with each other or with a nucleus of asphaltene molecules by ether and sulfide groups. Normal and branched alkanes, alkenes with even number of carbon atoms in the chain, mono- and polycycloalkanes, mono-, bi-, tri-, tetra- and pentacyclic aromatic hydrocarbons, dibenzothiophenes and fatty acids are the main representatives of such fragments. Among the compounds, adsorbed/occluded by the macromolecules of the asphaltene components under study, normal and branched alkanes, alkenes with an even number of carbon atoms in the chain, alkylcyclopentanes and alkylcyclohexanes, steranes and terpanes, mono-, bi- and trisubstituted alkylbenzenes, naphthalenes, phenanthrenes, benzo- and dibenzothiophenes, dibenzofurans, benzo- and dibenzocarbazoles were identified. The presence of the identified compounds in «maltenes» can be caused by both their sorption on macromolecular formations of asphaltenes and clathration with nanoaggregates particles of asphaltenes that have captured these compounds in the hollow cells of their structures at the early stages of oil systems formation.

Key words:

High- and low molecular asphaltenes, «maltenes», selective chemical destruction, structural fragments, composition, saturated and aromatic hydrocarbons, heteroorganic compounds.

REFERENCES

1. Torlomoyeva, A.E., Cheshkova T.V., Kovalenko E.Yu., Sagachenko T.A. Chemical composition of petroleum of Krapivinskoye oilfield. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 2, pp. 48–55. In Rus.
2. Kovalenko E.Yu., Yanovskaya S.S., Min R.S., Sagachenko T.A. Chemical composition of petroleum from Krapivinskoye oilfield (message 2). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 5, pp. 116–123. In Rus.
3. Buckley J.S., Wang J. Crude oil and asphaltene characterization for prediction of wetting alteration. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2002, vol. 33, no. 1–3, pp. 195–202.
4. Akbarzadeh K., Hammami A., Kharrat A., Zhang D., Allenson S., Creek J., Kabir S., Jamaluddin A., Marshall A.G., Rodgers R.P., Mullins O.C., Solbakken T. Asphaltenes – problematic but rich in potential (Review). *Oilfield Review*, 2007, vol. 19, no. 2, pp. 22–43.
5. Pomerantz A.E., Wu Q., Mullins O.C., Zare R.N. Laser-Based Mass Spectroscopic assessment of asphaltene molecular weight, molecular architecture and nanoaggregate weight. *Energy Fuels*, 2016, vol. 29, no. 5, pp. 2833–2842.
6. Kirbizhekova E.V., Prozorova I.V., Nebogina N.A., Grinko A.A., Yudina N.V. Dependence of the composition of asphalt and smolar paraffin deposits on the degree of water cut in oil. *Petroleum Chemistry*, 2016, vol. 56, no. 5, pp. 539–544. In Rus.
7. Kadiev Kh.M., Zaytseva O.V., Magomadov E.E., Chernysheva E.A., Oknina N.V., Batov A.E., Kadieva M.Kh., Kapustin V.M., Khadzhiyev S.N. Structural transformations of asphaltenes in the process of hydroconversion of tar with recirculation of the distillation residue of hydrogenated (recycle). *Petroleum Chemistry*, 2015, vol. 55, no. 4, pp. 337–346. In Rus.
8. Tumanyan B.P., Sinitsin S.A., Petrukhnina N.N., Pripakhaylo A.V. Redistribution of fractions of asphaltenes in the process of thermolysis of residual oil feedstock. *Oil and Gas Technologies*, 2014, no. 2, pp. 29–35. In Rus.
9. Igor N. Evdokimov, Aleksey A. Fesan, Aleksandr P. Losev. New Answers to the Optical Interrogation of Asphaltenes: Monomers and Primary Aggregates from Steady-State Fluorescence Studies. *Energy Fuels*, 2016, vol. 30, no. 6, pp. 4494–4503.
10. Grinrko A.A., Golovko A.K. Thermolysis of petroleum asphaltenes and their fractions. *Petroleum Chemistry*, 2014, vol. 54, no. 1, pp. 42–47.
11. Mamin G.V., Gafurov M.R., Yusupov R.V., Gracheva I.N., Ganeeva Yu.M., Yusupova T.N., Orlinkii S.B. Toward the Asphaltene Structure by Electron Paramagnetic Resonance Relaxation Studies at High Fields (3.4 T). *Energy Fuel*, 2016, vol. 30, no. 9, pp. 6942–6946.

12. Mullins O.C., Sabbah H., Eyssautier J., Pomerantz A.E., Barre L., Andrews A.B., Ruiz-Morales Y., Mostowfi F., McFarlane R., Goual L., Lepkowitz R., Cooper T., Orbulescu J., Leblanc R. M., Edwards J., Zare R.N. Advances in asphaltene science and the Yen-Mullins model. *Energy and Fuels*, 2012, vol. 26, no. 7, pp. 3986–4003.
13. Antipenko V.R., Grinrko A.A., Melenevskii V.N. Composition of products of analytical pyrolysis of resin and asphaltene fractions of USA oil. *Petroleum Chemistry*, 2014, vol. 54, no. 3, pp.178–186.
14. Shrausz O.P., Safarik I., Lown E.M. Morales-Izquierdo A. A critique of asphaltene fluorescence decay and depolarization-based claims about molecular weight and molecular architecture. *Energy and Fuels*, 2008, vol. 22, no. 2, pp. 1156–1166.
15. Snowdon L. R., Volkman J. K., Zhang Z., Tao G., Liu P. The organic geochemistry of asphaltenes and occluded biomarkers. *Organic Geochemistry*, 2016, vol. 91, pp. 3–15.
16. Kayukova G.P., Uspenskiy B.V., Abdrafikova I.M., Musin R.Z. Features of the hydrocarbon composition of the asphaltites of the Spiridonovsky deposit (Tatarstan) and natural bitumen of Lake Peach Lake (Trinidad and Tobago). *Petroleum Chemistry*, 2016, vol. 56, no. 4, pp. 337–345. In Rus.
17. Cheng B., Du J., Tian Y., Liu H., Liao Z. Thermal Evolution of Adsorbed/Occluded Hydrocarbons inside Kerogens and its Significance as Exemplified by One Low-Matured Kerogen from Santanghu Basin, Northwest China. *Energy Fuels*, 2016, vol. 30, no. 6, pp. 4529–4536.
18. Peng P., Morales-Izquierdo A., Hogg A., Strauaz O.P. Molecular structure of Athabasca asphaltene: sulfide, ether, and ester linkages. *Energy and Fuels*, 1997, vol. 11, no. 5, pp. 1171–1187.
19. Peng P., Morales-Izquierdo A., Lown E.M., Strauaz O.P. Chemical structure and biomarker content of Jinghan asphaltenes and kerogens. *Energy and Fuels*, 1999, vol. 13, no. 1, pp. 248–265.
20. Sergun V.P., Kovalenko E.Yu., Sagachenko T.A., Min R.S. Low-molecular-mass asphaltene compounds from Usa Heavy Oil. *Petroleum Chemistry*, 2014, vol. 54, no. 2, pp. 1–5. In Rus.
21. Sagachenko T.A., Sergun V.P., Cheshkova T.V., Kovalenko E.Yu., Min R.S. Khimicheskaya priroda maslyanykh i smolisto-asfaltеноvykh komponentov prirodnoogo bituma Ashalchinskogo mestorozhdeniya Tatarstana [Chemical nature of oil and tar-asphaltene components of natural bitumen from the Ashalchinsk deposit of Tatarstan]. *Solid Fuel Chemistry*, 2015, no. 6, pp. 12–18.
22. Kovalenko E.Yu., Sergun V.P., Min R.S., Sagachenko T.A. Peculiarities of the structure of macromolecules of heavy oil asphaltenes in the Usa Heavy Oil. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2013, no. 6, pp. 40–44. In Rus.
23. Sergun V.P., Cheshkova T.V., Sagachenko T.A., Min R.S. Structural units with sulfur and ether/ester bonds in molecules of high- and low molecular weight asphaltenes of Usa Heavy Oil. *Petroleum Chemistry*, 2016, vol. 56, no. 1, pp. 13–18. In Rus.

Received: 25 May 2017.

Informatuin about the authors

Valeriy P. Sergyn, Cand. Sc., researcher, Institute of petroleum chemistry Siberian branch Russian academy of science.

Tatyana V. Cheshkova, Cand. Sc., senior researcher, Institute of petroleum chemistry Siberian branch Russian academy of science.

Tatyana A. Sagachenko, Dr. Sc., leading researcher, Institute of petroleum chemistry Siberian branch Russian academy of science.

Raisa S. Min, Dr. Sc., head of the laboratory, Institute of petroleum chemistry Siberian branch Russian academy of science.

УДК 551.4 (571.150)

ОЦЕНКА ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ БЕРЕГОВЫХ СКЛОНОВ НА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА БАРНУЛА

Семикина Светлана Сергеевна¹,
swetik315@mail.ru

Сотников Петр Викторович²,
sotnikov.pet@yandex.ru

¹ Алтайский государственный университет,
Россия, 656049, г. Барнаул, пр. Ленина 61.

² ООО «Барнаулстройизыскания»,
Россия, 656049, г. Барнаул, ул. Чернышевского 281б.

Актуальность работы обусловлена активностью протекания оползневых процессов на территории г. Барнаула. Оползни, среди гравитационных процессов, независимо от первопричин, оказывают наибольшее воздействие на устойчивость природных геосистем, хозяйственную деятельность человека, объекты промышленности и инфраструктуры. В истории города отмечены оползни, значимые по масштабам и последствиям, принесшие большой экономический ущерб и гибель людей. Вследствие развития города Барнаула, увеличения техногенной нагрузки на береговой склон, возрастает потребность в прогнозе и оценке опасности оползневой зоны города для выделения участков, которым следует уделять большее внимание и контролировать антропогенное воздействие на них.

Цель работы: выполнить оценку оползневой опасности береговых склонов в черте города Барнаула.

Методы исследования: логический анализ, сбор материалов за весь период наблюдения за протеканием оползневых процессов, полевые наблюдения для выявления наиболее активных участков и факторов развития опасных геологических процессов, полуколичественный метод для оценки оползневой опасности береговых склонов города.

Результаты. С применением полуколичественного метода оценки опасности, включающего в себя определение вероятности проявления оползневых процессов в зависимости от воздействия факторов оползнеобразования и элементы бальной оценки, составлена картосхема степени оползневой опасности береговых склонов в черте города Барнаула. По результатам проделанной работы выделены и охарактеризованы участки в оползневой зоне города с различной степенью опасности. Полученные результаты исследования могут быть использованы при планировании инженерно-хозяйственной деятельности и проведении защитных мероприятий в оползневой зоне города.

Ключевые слова:

Береговой склон, процесс, оползень, оценка, опасность.

Введение

Оползневые процессы характеризуются внезапностью и высокой скоростью протекания. Они существенно изменяют рельеф земной поверхности, уничтожают расположенные на них уголья, нарушают устойчивость целых комплексов сооружений: зданий, дорог, каналов, разрушают их, вызывая природные катаклизмы с огромным экономическим ущербом и человеческими жертвами.

Город Барнаул относится к территориям с активным протеканием оползневых процессов. Оползневая зона Барнаула расположена на Обском левобережном склоне, на правобережном склоне р. Барнаулки. Ее протяженность составляет 42 км.

За период наблюдений, начиная с 1975 г., в городской оползневой зоне произошло более 400 оползней. В рамках предотвращения материального ущерба и гибели людей с 1974 по 1996 гг. в оползневой зоне Барнаула было снесено около тысячи домов и переселено более 8000 человек [1–5].

Наиболее «знаменитые» по масштабам и последствиям оползни в Барнауле:

- самый крупный оползень, из известных в истории города, произошел 22 февраля 1914 г. в 10 часов утра. Он получил название «Обвал Ту-

риной горы». Ширина оползня по факту составила 100 сажен (213 м). Язык его перегородил р. Обь до середины, взломав лед на протяжении 500 сажен. Сформированный гребень в реке высотой 15 м простоял 8 лет и впоследствии был размыт;

- оползень, вызвавший наибольшее количество жертв, случился 25 июня 1995 г. в 5 часов утра на склоне долины реки Обь в районе ОАО «Барнаульмясо». Здесь сошел относительно небольшой оползень (протяженностью по фронту 50 м, длина оползневого тела 180 м), но он разрушил 4 жилых дома, дачу, баню и унес жизни 9 человек;
- оползень объемом 20 тыс. м³, принесший наибольший ущерб, произошел 17 июня 1983 г. в 23 часа. Он полностью разрушил кирпичное здание насосной станции Барнаульского шинного завода и трансформаторную подстанцию. Были также разорваны водоводы и электрокабели, выведен из строя куст артезианских скважин, 2 экскаватора и бульдозер. Язык оползня достиг дома по ул. Красноярская, 384, жители которого были предупреждены и своевременно покинули его [6, 7].

Изучению оползневых процессов территории города посвящены работы А.Я. Швецова [7], В.И. Осипова, И.И. Молодых, Г.И. Швецова [8].

Основной целью данного исследования является оценка оползневой опасности береговых склонов города для предупреждения ведения инженерно-хозяйственной деятельности на наиболее опасных участках.

Факторы и условия развития оползневых процессов на исследуемой территории

Развитие оползневых процессов на территории г. Барнаула во многом зависит от её геологического строения и рельефа, режима осадков, подземных вод, действия русла реки Оби и антропогенной нагрузки.

Как указывается в научно-справочном атласе [9], в геоморфологическом отношении город приурочен к Приобскому плато и долинам р. Обь и р. Барнаулки. С поверхности большая часть территории города (вся площадь Приобского плато) сложена покровными лессами (суглинками и супесями). На склоне плато обнажаются суглинки и пески красnodубровской свиты. В подошве склона р. Обь прослеживаются глины и суглинки кочковской свиты. В центральной части города полосой, шириной 2,4–3 км, протягиваются песчаные отложения поймы и трех надпойменных террас р. Барнаулки. С востока и севера территория города обрамляется поймой р. Обь, сложенной в основном песчаными осадками поймы и русла реки.

Средой развития оползней на территории города Барнаула является мощная толща (40–90 м) отложений красnodубровской свиты, представленная лессовыми суглинками (реже супесями) мощностью до 12 м с прослоями песков. В нижней части толщи пески водоносные. Аллювиальные отложения поймы и надпойменных террас р. Барнаулки представлены песками, супесями и суглинками. Толща красnodубровской свиты залегает на плотных суглинках и глинах кочковской свиты, которые являются региональным водоупором и плоскостью скольжения оползней. Породы красnodубровской и кочковской свит обнажаются на левом коренном склоне реки Обь, где происходит пластовое выклинивание подземных вод по кровле глинистых водоупорных пород кочковской свиты в виде многочисленных родников и мочажин [9].

На развитие оползневых процессов в пределах территории г. Барнаула оказывает влияние четвертичный водоносный комплекс, который включает в себя водоносные горизонты современных и верхнечетвертичных аллювиальных отложений долин рек Оби, Барнаулки, Пивоварки [8].

В разрезе толщи четвертичных отложений мощностью 5–100 м развиты маломощные водоносные горизонты грунтового типа, воды спорадического распространения и грунтовые воды типа «верховодка». На левобережном коренном склоне долины Оби подземные воды красnodубровской свиты выклиниваются на дневную поверхность в

виде пластового выхода по кровле кочковских глин (суглинков) выше уреза воды в реке и являются одной из основных причиной оползневых процессов и явлений на склоне [9].

Русловые процессы реки Обь в районе г. Барнаула отличаются значительной спецификой и сложностью протекания. Одной из основных особенностей является высокая интенсивность высотных и плановых деформаций русла. Это характерная черта обусловлена как естественными факторами русловых процессов (уклоны водной поверхности, состав прорезаемых рекой отложений и донных наносов, гидрологические особенности водного режима), так и антропогенными (разработка пойменных и русловых карьеров, дноуглубительные работы, строительство инженерных сооружений в русле и на берегах реки, возведение берегоукреплений) [10].

Высокая интенсивность русловых процессов обуславливается возможностью крупных переформирований русла за относительно короткие промежутки времени, например, спрямление как отдельных крутых излучин, так и их серий, формирование новых протоков и заиление староречий. Так, в конце XIX в. на отдельных участках русло располагалось в центральной или правобережной частях дна долины, в дальнейшем постепенно смещалось к левому коренному берегу. Таким образом происходил подмыв левого берега, что приводило к активизации оползневых процессов [9].

Оползни г. Барнаула также связаны с метеорологическими условиями района. Климат характеризуется комплексом метеорологических элементов, которые почти все оказывают влияние на коэффициент устойчивости склонов. Это влияние можно оценить количественно, учитывая сезонные колебания прочности пород, вес профильтровавшейся части атмосферных осадков, снеговую и ветровую нагрузки, барометрическое давление и т. д.

Для образования и активизации оползней наиболее благоприятны атмосферные осадки холодного периода года, когда меньше потери на испарение. Поэтому внутригодовая активность поверхностных оползней возрастает в зимне-весенний период года [10].

Воздействие инженерно-хозяйственной деятельности человека на развитие оползневых процессов многогранно и порой имеет значительные масштабы, сопоставимые с природным воздействием на их развитие. По-существу, многие оползни Барнаула являются геотехногенными [11]. Активное воздействие на развитие оползневых процессов оказывают следующие причины, вызванные деятельностью человека: вывод на склон и прибрежную полосу водоводов, золопроводов, канализационных колодцев, непрерывная планировка застроенной территории, нерегулируемость стока атмосферных осадков, застройка площадей непосредственно у бровки обрывистого склона, загрузка склонов отвалами отходов техногенного производства [8].

Главной причиной антропогенного характера, вызывающей развитие оползневых процессов, является дополнительное увлажнение грунтов [8].

Методы оценки и виды прогнозов оползневой опасности

Для учета и предотвращения возможного неблагоприятного, разрушающего воздействия оползневых процессов на комплекс городских сооружений необходимо выполнение оценки и прогноза оползневой опасности, представляющей собой обобщение и анализ сведений о вероятности проявления, активизации и распространения оползней, получение которых возможно на основе выявления факторов, способствующих оползнеобразованию [12].

Прогноз оползневой опасности классифицируется на: долгосрочный прогноз опасных геологических процессов (ОГП), на основе оценки и районирования оползневой опасности и риска; среднесрочный прогноз, основанный на информации службы мониторинга за оползневыми процессами; краткосрочный прогноз, основанный на реальном времени; автоматическое дистанционное управление и контроль информации [13].

По вышеуказанной классификации долгосрочный прогноз основан на оценке оползневой опасности. Рассмотрим методы, используемые для оценки опасности, и условия их применения.

Качественная и полуколичественная оценка применяется, когда необходимые данные для численного выражения факторов оползневой опасности отсутствуют или их объем недостаточен. Основной их задачей является обеспечение эффективности при планировании строительства и реконструкции мероприятий инженерной защиты [14].

Метод количественной оценки применяется, когда имеется полный объем необходимых данных для определения числовых значений основных оползнеобразующих факторов.

Качественная оценка оползневой опасности и риска производится на основании экспертного анализа всей совокупности факторов, определяющих вероятность наступления оползневого события и его возможные последствия. Получаемая в результате оценки информация должна обеспечивать основу для разделения данных факторов на качественные характеристики оползневого риска («высокий», «средний», «низкий») [14].

Для каждого конкретного объекта исследования на подготовительном этапе устанавливаются четкие критерии и термины, которые будут в дальнейшем использоваться для классификации оползневых участков по категориям и вероятности наступления и тяжести возможных последствий. Степень оползневой опасности оценивается по принципу их пересечения и выражается категорией риска [14].

Практическое применение данного метода для выполнения регионального краткосрочного прог-

ноза оползневой опасности на территории горнолыжного комплекса «Казань» и г. Иннополис нашли сотрудники Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) федерального университета. В связи с нехваткой данных для осуществления количественного прогноза использовалась качественная оценочная шкала с использованием категорий «неизбежно», «возможно», «маловероятно». При этом прогнозируемая вероятность принималась достоверной при условии неизменности таких параметров, как уклон земной поверхности и строение грунтовой толщи [15, 16].

Полуколичественная оценка оползневой опасности основана на методе анализа иерархий и заключается в переходе от количественных и качественных характеристик природных и технических условий к балльным оценкам. Она применяется в случае необходимости оценить суммарное влияние на объект нескольких оползнеобразующих факторов, параметры которых выражены в различных размерностях.

Полуколичественная оценка оползневой опасности осуществляется в следующем порядке:

- разрабатываются частные балльные шкалы для каждого оцениваемого фактора;
- выбирается способ интеграции балльных оценок, и определяется результирующая шкала;
- осуществляется оценка каждого из компонентов оползневой опасности;
- по результатам полученных данных выводится интегральная кривая риска (опасности).

Каждый фактор оползневой опасности оценивается в безразмерных единицах – баллах, по специальным шкалам, разработанным исходя из интенсивности его проявления, а также роли, которую он играет в формировании оцениваемой геотехнической системы.

На основании полученных показателей вероятности ущерба и возможного смещения аналогично строится интегральная шкала оценки оползневой опасности [14].

Количественные методы оценки оползневой опасности и риска применяются при разработке проектных решений и мероприятий инженерной защиты на оползневых участках. Их преимуществом является высокая точность получаемых результатов.

Для оценки опасности и риска оползневого склона используют непрерывный и дискретный методы. Оба метода широко используются в инженерной геологии для изучения оползней, так как они применимы для слабых горных пород, где деформации определяются свойствами внутреннего строения или определены мелкими трещинами. Если горную породу рассматривать как единый массив с несколькими трещинами, используется непрерывный метод моделирования, основанный на методах конечных элементов или конечных разностей. Если деформация склона определена вдоль трещин горных пород, используется дис-

кретный метод. При таком подходе горная масса делится на небольшие блоки с числовыми функциями, характеризующие их взаимодействие, что позволяет имитировать свободное падение блока и широко используется для имитации обвала. Этот метод основан на точных геомеханических исследованиях, чтобы установить степень трещиноватости горного массива [17–20].

В опасных оползневых зонах для прогнозирования смещения горных масс с целью снижения риска все чаще применяют системы оповещения. Они могут своевременно проинформировать население, что позволит уменьшить влияние оползневых процессов на инженерно-хозяйственную деятельность. Современные системы предупреждения для прогнозирования состоят из технических компонентов, моделей и принятия решения человеком [21, 22]. Они используют типовые схемы скорости оползневых процессов для обнаружения событий.

В работу оповещения включают два этапа. На первом этапе система оповещения контролирует движение модели неустойчивого горного массива, чтобы отправить информацию мгновенного предупреждения. Неустойчивые склоны проявляют первые признаки деформации, такие как трещины разрыва, движение и увеличение активности [23]. Этот процесс включает в себя суточные колебания и зависит от температуры, атмосферных осадков, таяния снега и долгосрочного напряженно-деформированного состояния склонов, который контролирует распространение трещиноватости. Количество осадков, землетрясения, таяние снега, выветривание могут быть важными факторами, которые ослабляют горные массивы в ходе первого этапа [24]. Атмосферные осадки и таяние снега напрямую влияют на поровое давление воды, которая может стать основным фактором для смещения горной породы и окончательного срыва [25]. Для включения этих факторов в процедуры принятия решений, связанных с системами предупреждения, склоны часто оснащаются датчиками дождя и датчиками измерения порового давления воды [26].

На втором этапе происходит окончательное разрушение грунтовых связей и активизация гравитационных процессов [27, 28]. В этой фазе ускорения эксперты должны анализировать данные и применять модели для прогнозирования времени события и реализации соответствующих мер защиты [26].

Результаты и обсуждение

С точки зрения организации и ведения хозяйственной деятельности, а также планирования инженерно-защитных мероприятий территории г. Барнаула большое значение имеют сведения о степени опасности проявления оползневых процессов.

Для составления карты оползневой опасности города предполагается применять полуколичественный метод, включающий в себя определение

вероятности проявления оползней в зависимости от величины воздействия факторов-условий оползнеобразования и элементы бальной экспертной оценки.

Для оценки оползневой опасности береговых склонов на территории г. Барнаула выделены следующие факторы:

- породы, слагающие склон (литолого-генетические комплексы);
- относительное превышение плато над меженным уровнем, м;
- крутизна склона, град;
- расстояние от русла до подошвы склона, м;
- среднемноголетние суммы осадков (годовые или за характерные сезонные периоды), мм;
- деятельность подземных вод краснодубровского водоносного горизонта;
- инженерно-хозяйственная деятельность человека (антропогенный фактор);

В рекомендации по количественной оценке, устойчивости оползневых склонов [29] указывается, что факторы, которые являются практически однородными для оцениваемой территории, могут не учитываться при определении опасности оползневого склона.

К условно-однородным факторам оползнеобразования для территории г. Барнаула можно отнести: породы, слагающие склон (литолого-генетические комплексы), среднемноголетние суммы осадков (годовые или за характерные сезонные периоды), деятельность подземных вод краснодубровского водоносного горизонта.

В качестве факторов, которые имеют существенную пространственную изменчивость в пределах исследуемой территории и могут быть использованы в качестве критериев для оценки опасности оползнеобразования, выбраны: относительное превышение плато над меженным уровнем реки, крутизна склона, расстояние от русла до подошвы склона, инженерно-хозяйственная деятельность человека (антропогенный фактор).

Значения этих факторов были ранжированы и оценены от одного до трех баллов (табл. 1). При этом наивысшую оценку в баллах получили значения факторов наиболее значимые для оползнеобразования.

В ходе работы на основе табл. 1 были выделены участки оползневых склонов, различающиеся по характеру и величине действующих факторов-условий. Выделение участков проводилось по следующему алгоритму. Вначале выделялся участок склона с уклонами, попадающими в определенный интервал значений (табл. 1). Затем внутри выделенного участка измерялось относительное превышение плато над меженным уровнем воды в реке, после чего измерялось расстояние от русла до подошвы склона, и на заключительном этапе оценивался антропогенный фактор. В случае внутренней неоднородности участка по какому-либо из перечисленных критериев проводилось его дальнейшее деление.

Таблица 1. Шкала бальной оценки факторов-условий оползнеобразования на территории г. Барнаула

Table 1. Scale for evaluation of landslide hazard factors on the territory of Barnaul

Факторы-условия оползневой опасности Landslide hazard factors	Вклад факторов-условий в формирование оползневой опасности, балл Potential effect of factors on the landslide hazard processes, grade points		
	1	2	3
Относительное превышение плато над меженным уровнем, м Relative elevation of plateau above low-water stage, m	Менее 10 Less than 10	10–30	Более 30 More than 30
Крутизна склона, град Slope inclination, grades	29 и менее 29 and less	30–39	40 и более 40 and more
Расстояние от русла до подошвы склона, м Distance from the river bed to the bottom of slope, m	Более 20 More than 20	10–20	0–10
Инженерно-хозяйственная деятельность человека (антропогенный фактор) Economic planning activities (anthropogenic factor)	Расстояние от жилой застройки и промышленных объектов более 100 м Distance from a residential area and industrial site is exceeding 100 m	Жилая застройка вплотную подходит к бровке склона Residential area comes close to the edge of the slope	Промышленные объекты подходят вплотную к бровке склона Industrial sites come close to the edge of the slope

Следующим этапом было определение степени опасности оползневого склона (табл. 2) на каждом из выделенных участков. Для этого мы суммировали баллы оценки факторов-условий, определенные в соответствии с табл. 1.

Таблица 2. Степень опасности оползневого склона

Table 2. Hazard analysis of a landslide slope

Интервал баллов/Grade points	Степень опасности/Hazard level
4–6	Слабо опасные/Low
7–9	Опасные/High
10–12	Очень опасные/Extremely high

Основываясь на табличные данные (табл. 1, 2), мы выделили в оползневой зоне г. Барнаула участки с различной степенью оползневой опасности (рисунок).

По результатам составленной картосхемы (рисунок), с учетом многолетних наблюдений оползневой станции, на опасных участках возможно проявление оползневых процессов, для ведения инженерно-хозяйственной деятельности в данных районах необходимо принятие соответствующих мер.

По итогам оценки опасности установлено, что очень опасные участки занимают 42 % от общей протяженности оползневой зоны г. Барнаула, опасные – 48 % и слабо опасные – 10 %.

Очень опасные участки распространены в местах отсутствия поймы р. Обь и в местах с высокой антропогенной нагрузкой, где основными оползнеобразующими факторами являются: размывающая деятельность реки, производящая подмыв и обрушение берегов, сносящая сползшие массы грунта (играющие роль контрбанкета), обуславливая повышенную крутизну склона и препятствуя его стабилизации, и техногенное воздействие на склон – дополнительное увлажнение грунтов.

Также очень опасные участки можно характеризовать по степени пораженности. По данным ре-

зультатов наблюдений Оползневой станции за ОВП очень сильной пораженностью характеризуются участки: от Барнаульского санатория до нового автомобильного моста через р. Обь (на этом участке почти весь Обской склон поражен оползневыми цирками) и от Барнаульской нефтебазы до старого железнодорожного моста через р. Обь. Для них коэффициент пораженности K_p (K_p равен отношению площади, занимаемой оползневыми цирками, к общей площади участка) варьирует от 0,5 до 1,0. Сильная пораженность склона оползнями (K_p 0,25–0,5) наблюдается на участках от устья Барнаулки до Овчинно-меховой фабрики (АО «Руно») и от ТЭЦ-2 до завода техуглера, включая оба эти предприятия. Средняя пораженность (K_p 0,1–0,25) характерна для участков от железнодорожной выемки до ТЭЦ-2 и от завода техуглера до АО «Барнаульмясо» включительно. Слабо поражен оползнями (K_p меньше 0,1) участок Обского склона от д. Ерестной до 1 речного водозабора и правый склон долины р. Барнаулки от устья её до западной границы города.

На опасных участках размывающая деятельность отсутствует, основными оползнеобразующими факторами на вышеуказанных участках является антропогенная нагрузка, высота и крутизна склона.

Слабо опасные участки характеризуются небольшим превышением плато над меженным уровнем и небольшой крутизной склона. Основным оползнеобразующим фактором является инженерно-хозяйственная деятельность.

Заключение

К настоящему времени оползневой станцией накоплен значительный по объему статистический материал, характеризующий оползневую обстановку в г. Барнауле с 1974 г. [30]. Собранные данные позволяют судить о динамике оползневых процессов, объемах сместившихся масс, а также

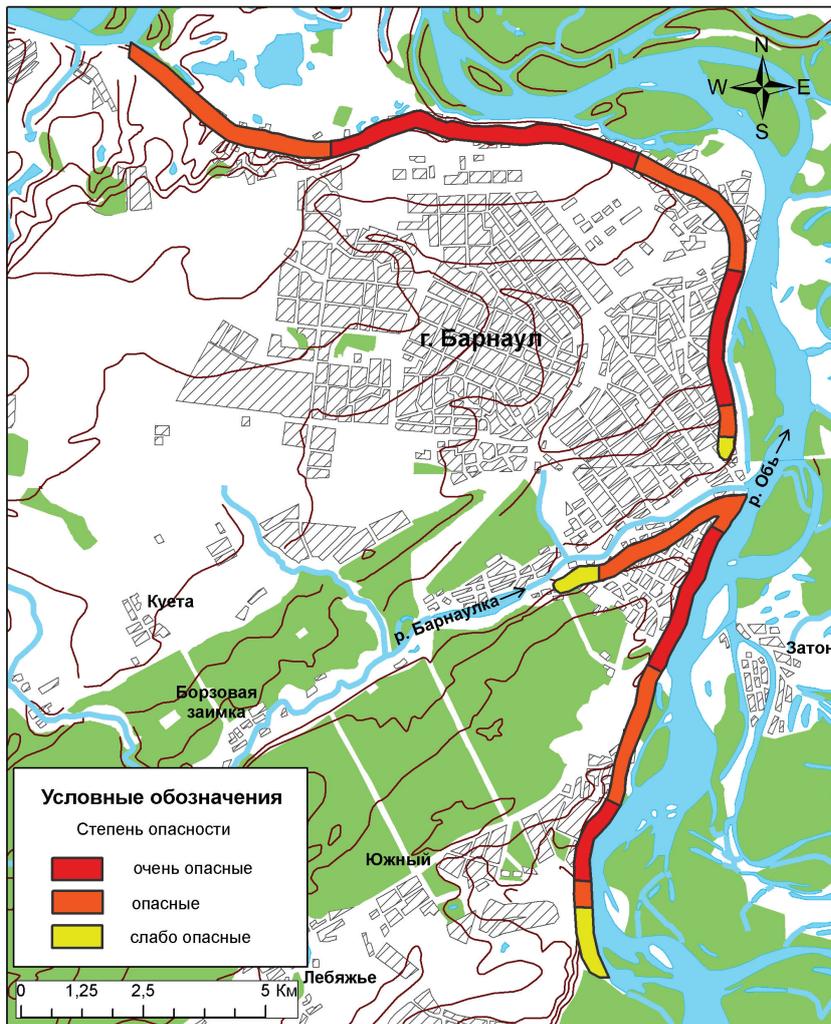


Рисунок. Картограмма оценки степени оползневой опасности береговых склонов в черте города Барнаула

Figure. Landslide hazard map for assessing sloping shoreline of Barnaul

экономическом ущербе, нанесенном городу и его жителям.

Развитие оползневых процессов на территории г. Барнаула во многом зависит от сочетания её геологического строения и рельефа, режима осадков, подземных вод, действия русла реки Оби и антропогенной нагрузки, имеющие тенденцию расширения масштабов развития со временем.

Проведенные исследования показали, что при анализе нескольких оползнеобразующих факторов, параметры которых выражены в различных размерностях, прогноз оползневой опасности, возможно, осуществлять, используя метод полукваликативной оценки.

На основе проведенной оценки степени оползневой опасности нами выделены участки береговых склонов с различной степенью оползневой опасности.

По результатам проведенного исследования, с использованием данных многолетних наблюдений

оползневой станции, нами выделены очень опасные участки, где ежегодно фиксируются оползнепроявления. На этих участках следует вести более детальные наблюдения за состоянием берегового склона и за факторами проявления оползнеобразующих процессов для своевременного предотвращения катастрофы.

Для более детального наблюдения возможно использование свободно распространяемых данных космической съемки высокого разрешения для определения отдельных параметров оползней: изменение положения бровки оползневого склона, подсчет площади поверхностей сползших блоков. Дистанционное зондирование существенно дополнит данные наземных наблюдений, особенно в случаях, когда наземная съемка оползневой цирка затруднена по каким-либо причинам [10].

Полученные результаты могут быть использованы при планировании хозяйственной деятельности и защитных мероприятий в прибрежной части береговых склонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационная сводка о проявлении экзогенных процессов на территории Алтайского края за 2006 год. – Боровиха, 2006. – 11 с.
2. Информационная сводка о проявлении экзогенных процессов на территории Алтайского края за 2007 год. – Боровиха, 2007. – 19 с.
3. Информационная сводка о проявлении экзогенных процессов на территории Алтайского края за 2008 год. – Боровиха, 2008. – 28 с.
4. Информационная сводка о проявлении экзогенных процессов на территории Алтайского края за 2009 год. – Боровиха, 2009. – 24 с.
5. Информационная сводка о проявлении экзогенных процессов на территории Алтайского края за 2010 год. – Боровиха, 2010. – 21 с.
6. Швецов А.Я., Осьмушкин В.С. Основные тенденции и прогноз развитие опасных геологических и геотехнических процессов в г. Барнауле. – Барнаул: АлтГТУ, 2006. – 41 с.
7. Швецов А.Я., Осьмушкин В.С. Техногенное воздействие на развитие опасных природных процессов // Строительный комплекс и градостроительство, в свете выполнения национального проекта «Доступное комфортное жилье – гражданам России». – Барнаул: АлтГТУ, 2008. – С. 104–106.
8. Осипов В.И., Молодых И.И., Швецов Г.И. Деформируемость лессовых пород на урбанизированных территориях приобского плато // Вестник Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. – 2000. – № 1. – С. 52–67.
9. Барнаул. Научно-справочный атлас. – Новосибирск: ФГУП «ПО Инжгеодезия» Роскартография, 2006. – 100 с.
10. Сотников П.В. Динамика развития гравитационных процессов г. Барнаула // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XX Междунар. Симпозиума. – Томск, 2016. – С. 594–596.
11. Информационная сводка о проявлении экзогенных процессов на территории Алтайского края за 2011 год. – Боровиха, 2011. – 31 с.
12. Спасская К.А. Критерии выбора варианта направления трассы железно дороги, учитывающее развитие оползневых процессов // Интернет-журнал «Науковедение». – 2014. – Вып. 3. – С. 1–11. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/92TVN314.pdf> (дата обращения: 15.11.2016).
13. Pinggen Z., Leihua Y. Landslide hazard early warning system in China and Future trends // IAEG. – 2006. – № 805. – P. 1–5.
14. ОДМ 218.2.030–2013. Методические рекомендации по оценке оползневой опасности на автомобильных дорогах. – М.: Росавтодор, 2014. – 75 с.
15. Латыпов А.И., Жаркова Н.И., Нуриев И.С. Моделирование развития оползневых процессов для прогноза оползневой опасности на территории горнолыжного комплекса «Казань» и г. Иннополис // Ученые записки Казанского Университета. Естественные науки. – 2014. – Т. 156. – Кн 1. – С. 148–162.
16. Латыпов А.И., Жаркова Н.И. Оценка оползневой опасности на территории строящегося города Иннополис (Татарстан) для организации системы геодинамического мониторинга // Инженерные изыскания. – 2013. – № 10–11. – С. 56–59.
17. Capabilities of continuous and discontinuous modeling of a complex, structurally controlled landslide / G. Bossi, L. Zabuski, A. Pasuto, G. Marcato // Geotech. Geol. Eng. – 2016. – № 34. – P. 1677–1686.
18. Barla M., Piovano G., Grasselli G. Rock slide simulation with the combined finite-discrete element method // Int. J. Geomech. – 2012. – № 12. – P. 711–721.
19. Eberhardt E. From cause to effect: using numerical modeling to understand rock slope instability mechanisms // Landslides from massive rock slope failure. – Netherlands: Springer, – 2006. – P. 85–101.
20. Jing L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modeling for rock mechanics and rock engineering // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2003. – № 40. – P. 283–353.
21. Geological model of the Aknes rockslide, western Norway / G.V. Ganerod et al. // Eng. Geol. – 2008. – № 102. – P. 1–18.
22. Sturny R.A., Brundl M. Bayesian Networks for Assessing the Reliability of a Glacier Lake Warning System in Switzerland // Interpraevent 2014 in the Pacific Rim // Eds. M. Fujita et al. – Nara, Japan, 2014. – P. 212–213.
23. Hungri O., Evans S. The occurrence and classification of massive rock slope failure // Felsbau. – 2004. – № 22. – P. 16–23.
24. Lacasse S., Eidsvik U., Nadim F. Event tree analysis of Aknes rock slide hazard // 4th Canadian conference on geohazards. – Quebec: Universite Laval, 2008. – P. 20–24.
25. Loew S., Gischig V., Moore J. Monitoring of potentially catastrophic rockslides // Proc. of 11th Int. and 2nd North Am. Symp. on Landslides and Engineered Slopes. – Banff, Canada, 2012. – P. 101–116.
26. Sättele M., Krautblatter M., Straub D. Forecasting rock slope failure: how reliable and effective are warning systems? // Landslides. – 2016. – № 13. – P. 737–750.
27. Petley D. On the initiation of large rockslides: perspectives from a new analysis of the Vaiont movement record // Landslides from Massive Rock Slope Failure. – Netherlands: Springer, 2006. – P. 77–84.
28. Petley D., Higuchi T., Dunning S. A new model for the development of movement in progressive landslides // International conference on landslide risk management. – Vancouver: Taylor & Francis Ltd., 2005. – P. 350–358.
29. Рекомендации по количественной оценке устойчивости оползневых склонов / ред. Производственного и научно-исследовательского института по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС). – М.: Стройиздат, 1984. – 80 с.
30. Сводный отчет оползневой станции по стационарным наблюдениям за геодинамическими (оползневыми) процессами р. Обь в г. Барнауле за 1974–1984 гг. / В.Г. Бородавко, В.Н. Шелеметьев и др. – Новокузнецк, 1990. – Кн. 1. – 264 с.

Поступила 15.05.2017 г.

Информация об авторах

Семикина С.С., кандидат географических наук, доцент кафедры природопользования и геоэкологии Географического факультета Алтайского государственного университета.

Сотников П.В., инженер геолог ООО «Барнаулстройизыскания».

UDC 551.4 (571.150)

ASSESSMENT OF LANDSLIDE HAZARD OF THE SLOPING SHORELINE ON THE TERRITORY OF BARNAUL

Svetlana S. Semikina¹,
swetik315@mail.ru

Petr V. Sotnikov²,
sotnikov.pet@yandex.ru

¹ Altai State University,
61a, Lenin avenue, Barnaul, 656049, Russia.

² LLC «BarnaulStrojIzyskaniya»,
281b, Chernyshevskogo street, Barnaul, 656049, Russia.

Relevance of the research is caused active landslide processes on the territory of Barnaul. Among all gravity processes, irrespective of their origin, landsliding affects most of all on stability of geosystems, economic activities, industrial and infrastructure facilities. Several large-scale landslides causing considerable economic losses and deaths have punctuated the city's history. As a result of urban development and the increasing industrial impact on the shoreline areas there is a growing demand for hazard analysis of the sloping shoreline and identifying the sites within landslide hazard zoning of the city which should be given prime attention and monitored under the influence of anthropogenic activities.

Aim of the work is to carry out landslide hazard assessment of the sloping shoreline on the territory of Barnaul.

Research methods: logic analysis, collecting factual material for the entire period of landslide observation, field surveys for detecting the most geologically active areas and reasons for the development of hazardous geological processes, semi-quantitative method of landslide hazard assessment.

Results. Applying a semi-quantitative method of landslide hazard assessment for establishing the probability of landsliding, depending upon the specific nature of the impact and grading it by points, the authors have designed a landslide hazard map for the sloping shoreline of Barnaul. Landslide hazard assessment is carried out on the basis of the presented map. The sites within landslide hazard zoning of the city are identified and characterized with varying degrees of risks. The given results can be applicable to economic planning activities and protection policies management in the areas of sloping shoreline.

Key words:

Sloping shoreline, process, landslide, assessment, hazard.

REFERENCES

1. *Informatsionnaya svodka o proyavlenii ekzogennykh protsessov na territorii Altayskogo kraya za 2006 god* [Summary information on exogenous processes manifestation on the territory of Altai for 2006]. Borovikha, 2006. 11 p.
2. *Informatsionnaya svodka o proyavlenii ekzogennykh protsessov na territorii Altayskogo kraya za 2007 god* [Summary information on exogenous processes manifestation on the territory of Altai for 2007]. Borovikha, 2007. 19 p.
3. *Informatsionnaya svodka o proyavlenii ekzogennykh protsessov na territorii Altayskogo kraya za 2008 god* [Summary information on exogenous processes manifestation on the territory of Altai for 2008]. Borovikha, 2008. 18 p.
4. *Informatsionnaya svodka o proyavlenii ekzogennykh protsessov na territorii Altayskogo kraya za 2009 god* [Summary information on exogenous processes manifestation on the territory of Altai for 2009]. Borovikha, 2009. 24 p.
5. *Informatsionnaya svodka o proyavlenii ekzogennykh protsessov na territorii Altayskogo kraya za 2010 god* [Summary information on exogenous processes manifestation on the territory of Altai for 2010]. Borovikha, 2010. 21 p.
6. Shvetsov A. Ya., Osmushkin V. S. *Osnovnye tendentsii i prognoz razvitiya opasnykh geologicheskikh i geotekhnicheskikh protsessov v g. Barnaukt* [The main trends and forecast of the development of hazardous geological and geotechnical processes in Barnaul]. Barnaul, AltSTU, 2008. 41 p.
7. Shvetsov A. Ya., Osmushkin V. S. *Tekhnogennoe vozdeystvie na razvitie opasnykh prirodnykh protsessov* [Technogenic impact on development of hazardous natural processes]. *Stroitelny kompleks i gradostroitelstvo, v svete vypolneniya natsionalnogo proekta «Dostupnoe komfortnoe zhile – grazhdanam Rossii»* [Construction sector and town planning, in the framework of the national project «Affordable and comfortable housing to the citizens of Russia»]. Barnaul, AltSTU, 2008. pp. 104–106.
8. Osipov V. I., Molodykh I. I., Shvetsov G. I. *Deformiruemost lessovykh porod na urbanizirovannykh territoriyakh priobskogo plato* [Deformability of loess rocks in urban territories of Priobskoye plateau]. *Bulletin Altai State Technical University*, 2000, no. 1, pp. 52–67.
9. *Barnaul. Nauchno-spravochnyy atlas* [Atlas of Barnaul city]. Novosibirsk, «PO Inzhgeodeziya» Roskartografiya Publ., 2006. 100 p.
10. Sotnikov P. V. *Dinamika razvitiya gravitatsionnykh protsessov g. Barnaula* [Dynamics of development of gravitational processes in Barnaul]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr: Trudy XX Mezhdunarodnogo Simpoziuma* [Problems of geology and subsurface development: Proc. 20th Int. Symp./]. Tomsk, 2016. pp. 594–596.
11. *Informatsionnaya svodka o proyavlenii ekzogennykh protsessov na territorii Altayskogo kraya za 2011 god* [Summary information on exogenous processes manifestation on the territory of Altai for 2011]. Borovikha, 2011. 31 p.
12. Spasskaya K. A. *Criteria for selecting the direction of the railway, based on landslide dynamics*. *Naukovedenie*, 2014, Iss. 3, pp. 1–11. In Rus. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/92TVN314.pdf> (дата обращения: 15 November 2016).
13. Pinggen Z., Leihua Y. *Landslide hazard early warning system in China and Future trends*. *IAEG*, 2006, no. 805, pp. 1–5.

14. ODM 218.2.030–2013. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke opolznevoy opasnosti na avtomobilnykh dorogax* [Branch road methodological document 218.2.030–2013. Guidelines for the assessment of landslide hazard on the roads]. Moscow, Rosavtodor Publ., 2014. 75 p.
15. Latypov A.I., Zharkova N.I., Nuriev I.S. Modeling landslide processes for forecasting landslide hazard within the territory of «Kazan» ski complex and city of Innopolis. *Uchenye zapiski Kazanskogo Universiteta. Estestvennye nauki*, 2014, vol. 156, Iss. 1, pp. 148–162. In Rus.
16. Latypov A.I., Zharkova N.I. Otsenka opolznevoy opasnosti na territorii stroyashchegosya goroda Innopolis (Tatarstan) dlya organizatsii sistemy geodinamicheskogo monitoringa [Assessment of landslide hazard in the territory of the constructed city of Innopolis (Tatarstan) for geodynamic monitoring]. *Inzhenernye izyskaniya*, 2013, no. 10–11, pp. 56–59.
17. Bossi G., Zabuski L., Pasuto A., Marcato G. Capabilities of continuous and Discontinuous modeling of a complex, structurally controlled landslide. *Geotech. Geol. Eng.*, 2016, no. 34, pp. 1677–1686.
18. Barla M., Piovano G., Grasselli G. Rock slide simulation with the combined finite-discrete element method. *Int. J. Geomech.*, 2012, no. 12, pp. 711–721.
19. Eberhardt E. From cause to effect: using numerical modeling to understand rock slope instability mechanisms. *Landslides from massive rock slope failure*. Netherlands, Springer, 2006. pp. 85–101.
20. Jing L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modeling for rock mechanics and rock engineering. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2003, no. 40, pp. 283–353.
21. Ganerod G.V. Geological model of the Aknes rockslide, western Norway. *Eng. Geol.*, 2008, no. 102, pp. 1–18.
22. Sturny R.A., Brundl M. Bayesian Networks for Assessing the Reliability of a Glacier Lake Warning System in Switzerland. *Interpraevent 2014 in the Pacific Rim*. Nara, Japan, 2014. Ed by M. Fujita. pp 212–213.
23. Hungr O., Evans S. The occurrence and classification of massive rock slope failure. *Felsbau*, 2004, no. 22, pp. 16–23.
24. Lacasse S, Eidsvik U, Nadim F. Event tree analysis of Aknes rock slide hazard. *4th Canadian conference on geohazards*. Quebec, Universite Laval, 2008. pp. 20–24.
25. Loew S., Gischtig V., Moore J. Monitoring of potentially catastrophic rockslides. *Proc. of 11th Int. and 2nd North Am. Symp. on Landslides and Engineered Slopes*. Banff, Canada, 2012. pp. 101–116.
26. Sättele M., Krautblatter M., Straub D. Forecasting rock slope failure: how reliable and effective are warning systems? *Landslides*, 2016, no. 13, pp. 737–750.
27. Petley D. On the initiation of large rockslides: perspectives from a new analysis of the Vaiont movement record. *Landslides from Massive Rock Slope Failure*. Netherlands, Springer, 2006. pp. 77–84.
28. Petley D., Higuchi T., Dunning S. A new model for the development of movement in progressive landslides. *International conference on landslide risk management*. Vancouver, Taylor & Francis Ltd., 2005. pp. 350–358.
29. Rekomendatsii po kolichestvennoy otsenke ustoychivosti opolznevyykh sklonov. Red proizvodstvennogo i nauchno-issledovatel'skogo instituta po inzhenernym izyskaniyam v stroitelstve [Recommendations for quantification of landslide slope stability] (PNIIS). Moscow, Stroyizdat Publ., 1984. 80 p.
30. Borodavko V.G. Svodny otchet opolznevoy stantsii po statsionarnym nablyudeniyam za geodinamicheskimi (opolznevymi) protsesami r. Ob v g. Barnaule za 1974–1984 gg [Summary report of landslide station static geodynamic observations for the river Ob in Barnaul city for 1974–1984]. Novokuznetsk, 1990. Vol. 1, 264 p.

Received: 15 May 2017.

Information about the authors

Svetlana S. Semikina, Cand. Sc., associate professor, Altai State University.

Petr V. Sotnikov, engineering geologist, LLC «BarnaulStrojIzyskaniya».

УДК 539.1.074

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДЕТЕКТОРА ИЗ ОСОБО ЧИСТОГО ГЕРМАНИЯ

Алейников Юрий Владимирович¹,
aleinikov@nnc.kz

Попов Юрий Анатольевич¹,
Popov@nnc.kz

Прозорова Ирина Валентиновна¹,
Prozorova@nnc.kz

Прозоров Александр Андреевич²,
prozorov_a_a@mail.ru

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

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

Актуальность работы. Одной из важнейших современных проблем геоэкологии является разработка методов и средств контроля радиационного фона естественного и техногенного происхождения на основе высокоточных портативных полупроводниковых детекторов. Известные способы расчета таких детекторов по методу Монте-Карло широко применяются в области радиационной безопасности: радиационная защита, расчеты ядерных реакторов, экранирование и моделирование детекторов, проводятся расчеты радиационных параметров полей источников ионизирующего излучения. Программа MCNP, реализующая метод Монте-Карло, является инструментом моделирования для переноса излучения, в основном в тех случаях, когда измерения затруднены или практически не выполнимы. В данной работе программа MCNP использовалась для моделирования детектора из особо чистого германия Ge (Li) и методики по улучшению определения функции отклика для данного типа детектора. Результаты, полученные при моделировании, являются достаточно точными, имеют хорошие совпадения между модельными и экспериментальными данными.

Цель работы: моделирование детектора из особо чистого германия Ge (Li) типа GC1020 для решения задач оценки эффективности регистрации излучения.

Методы исследования: построение и корректировка геометрической и физической модели детектора; проведение вариантов расчетов по определению эффективности регистрации детектором моноэнергетического гамма-излучения с помощью программы MCNP5.

Результаты. Моделирование детектора из особо чистого германия с помощью метода Монте-Карло важно для получения эффективности регистрации в случае образцов с нестандартной геометрией и при больших выборках, когда эффективность сложно оценить экспериментально. В работе представлены расчеты эффективности полупроводникового детектора, широко используемого в нашей лаборатории для различных образцов, которые были выполнены для геометрии с точечным источником, и затем параметры детектора были оптимизированы с 5 % погрешностью между MCNP и экспериментальной эффективностью на различных расстояниях от детектора. Оптимизированная геометрия детектора затем была подтверждена эффективным переносом в другие геометрии.

Ключевые слова:

Источник, эффективность регистрации гамма-излучения, полупроводниковый детектор, моделирование по методу Монте-Карло, оптимизация геометрии детектора.

Введение

Чистый германий обладает высокой эффективностью регистрации гамма-излучения. Рабочий диапазон регистрируемых коаксиальным германиевым детектором энергий составляет от 40 кэВ до 10 МэВ. Для детектора характерно высокое энергетическое разрешение и хорошая форма пика. Калибровка детектора по эффективности регистрации гамма-квантов обычно выполняется при помощи моноэнергетических источников гамма-излучения, например, таких как: ²⁴¹Am, ¹⁰⁹Cd, ⁵⁷Co, ²⁰³Hg, ⁵¹Cr, ¹³⁷Cs и ⁶⁵Zn из набора образцовых спектрометрических гамма-источников (ОСИ). С появлением детекторов с высоким разрешением предпочтение зачастую отдается источникам, из-

лучающим несколько гамма-линий, таким как: ¹³³Ba, ¹⁵²Eu и ²²⁸Th, поскольку они охватывают широкий диапазон энергий и имеют продолжительный срок службы. Но зачастую эти источники испускают гамма-излучение в каскаде, и для образцов, близко расположенных к детектору, появляются неточности в калибровке из-за суммирования пиков.

Эти трудности можно обойти при помощи метода Монте-Карло, используя программу MCNP. Это мощный инструмент для моделирования отклика детектора, и он применим к различным материалам и источникам. Метод особенно удобен для оценки эффективности в случаях, когда проведение экспериментальных измерений не представля-

ется возможным или затруднено, как, например, в случае крупногабаритных образцов или образцов с нестандартной геометрией: твэлы сложной формы, образцы из природных материалов и контейнеры с радиоактивными отходами, когда невозможно использовать стандартные калибровочные источники. Таким образом, метод Монте-Карло все чаще применяются для моделирования систем «радиоактивный источник – детектор», в том числе источников, имеющих несколько гамма-линий. Так как моделирование представляет собой независимую схему радиоактивного распада, то, следовательно, оно свободно от каких-либо совпадений из-за суммирования пиков и может быть использовано для калибровки детектора на малых расстояниях.

Экспериментальные исследования

В работе использовался полупроводниковый детектор из особо чистого германия типа GC1020 [1, 2]. Относительная эффективность регистрации детектора составляет 10 %. На рис. 1 изображена схема детектора. В табл. 1 приведены линейные параметры детектора. Толщина литиевого покрытия кристалла составляет 700 мкм (на схеме не приведено).

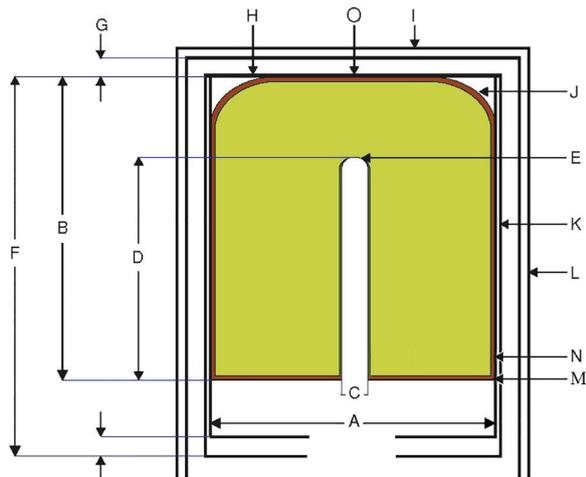


Рис. 1. Схема германиевого детектора: А) диаметр кристалла; В) высота кристалла; С) диаметр отверстия; D) глубина отверстия; Е) толщина внутреннего борного покрытия технологического отверстия; F) высота кронштейна; G) вакуумное пространство; H) толщина алюминиевого окошка; I) толщина окошка крышки детектора; J) толщина мертвого слоя на скосе кристалла; K) толщина стенки кронштейна; L) толщина стенки крышки детектора; M) толщина нижнего мертвого слоя; N) толщина бокового мертвого слоя; O) толщина верхнего мертвого слоя

Fig. 1. Schematic geometry of the germanium detector: A) diameter of the crystal; B) height of the crystal; C) hole diameter; D) hole depth; E) thickness of the internal coating of boron technological hole; F) height of the bracket; G) vacuum space; H) thickness of the aluminum window; I) thickness of the end cap window; J) thickness of the dead layer on the bevel of the crystal; K) thickness of the mount cup; L) thickness of the end cap; M) thickness of the bottom of the dead layer; N) thickness of the side of the dead layer; O) thickness of the upper dead layer



Рис. 2. Кристалл из особо чистого германия

Fig. 2. Crystal of high purity germanium

Таблица 1. Линейные параметры детектора
Table 1. Linear parameters of the detector

Буквенное обозначение Lettering	Параметр детектора Parameter of the detector	Значение, мм Value, mm
A	Диаметр кристалла Diameter of the crystal	47,0
B	Высота кристалла/Height of the crystal	45,5
C	Диаметр отверстия/Hole diameter	10
D*	Глубина отверстия/Hole depth	–
E	Толщина внутреннего борного покрытия технологического отверстия Thickness of the internal coating of boron technological hole	0,7
F	Высота кронштейна/Height of the bracket	52,8
G	Вакуумное пространство/Vacuum space	6,0
H	Толщина алюминиевого окошка Thickness of aluminum window	0,03
I	Толщина окошка крышки детектора Thickness of the end cap window	1,0
K	Толщина стенки кронштейна Thickness of the mount cup	1,0
L	Толщина стенки крышки детектора Thickness of the end cap	1,0
M*	Толщина нижнего мертвого слоя Thickness of the bottom of the dead layer	–
N*	Толщина бокового мертвого слоя Thickness of the side of the dead layer	–
O*	Толщина верхнего мертвого слоя Thickness of the upper dead layer	–
J*	Толщина мертвого слоя на скосе кристалла Thickness of the dead layer on the bevel of the crystal	–

*Изменяемые параметры детектора.

*Detector variables.

Калибровка по эффективности детектора проводилась при помощи точечных источников ^{60}Co , ^{137}Cs и ^{152}Eu из набора ОСГИ-3-2 в диапазоне энергий от 120 до 1408 кэВ. Погрешность определения активности источников составляет 3 % при доверительной вероятности 0,95. Характеристики источников приведены в табл. 2. Значения активности источников приведены на 10 апреля 2016 г. Геометрические параметры источника приведены на рис. 3.

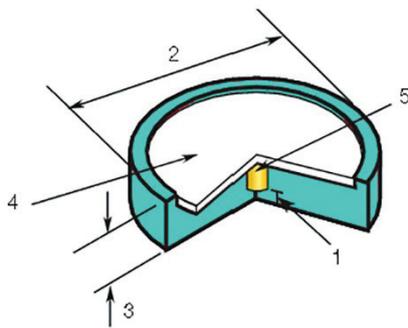


Рис. 3. Геометрические параметры источника: 1) толщина окна (2,77 мм); 2) диаметр источника (25,4 мм); 3) высота источника (3,35 мм); 4) пластик; 5) активный элемент

Fig. 3. Source geometry: 1) window thickness (2,77 mm); 2) source diameter (25,4 mm); 3) height of source (3,35 mm); 4) plastic; 5) active element

При проведении измерений источники располагались на расстояниях 50, 100, 150, 200, 250 и 350 мм от торцевой крышки детектора.

Таблица 2. Характеристики калибровочных источников

Table 2. Features of calibration sources

Источник Source	Номер источника Number of source	Активность A, Бк Activity in Bq	Период полу- распада $T_{1/2}$, сут The half-life $T_{1/2}$ days
Cs-137	10656	42500	11005
Eu-152	10658	44200	4940
Co-60	4633	46900	1925

Все зарегистрированные спектры были проанализированы при помощи программной среды Genie-2000 [3]. Экспериментальные зависимости значений эффективности регистрации детектора от энергии гамма-квантов были построены в двойном логарифмическом масштабе и аппроксимированы полиномами четвертого порядка.

Эффективность регистрации гамма-квантов энергии E_γ рассчитывалась по формуле (1):

$$\varepsilon(A_\gamma) = \frac{S_{\text{ППП}}}{t_{\text{ж}}} \frac{e^{\lambda t}}{\delta A}, \quad (1)$$

где $S_{\text{ППП}}$ – площадь пика полного поглощения (ППП), отн. ед.; λ – постоянная распада, с^{-1} ; t – время, прошедшее с момента аттестации источника; $t_{\text{ж}}$ – «живое» время измерения, с; p – выход гамма-квантов на распад, отн. ед.; A – активность источника на момент аттестации, Бк.

Моделирование методом Монте-Карло

Для моделирования отклика особо чистого германиевого детектора использовалась версия MCNP5 [4]. Программа отслеживает частицу от точки рождения до места ее полного поглощения. Учитываются все первичные и вторичные взаимодействия. Эффективность регистрации гамма-квантов при моделировании была задана с помощью оценки, в которой суммировались кванты, испытывающие полное поглощение в чувствительном объеме детектора. В геометрическую модель были включены все поглощающие материалы среды. Для уменьшения статистической погрешности расчетов были разыграны $2 \cdot 10^8$ историй.

Проблема при моделировании состояла в том, что только некоторые данные (диаметр, высота кристалла и ширина вакуумного пространства) предоставлены официальным поставщиком гамма-спектрометра. Все остальные значения пришлось подбирать самостоятельно. Однако, согласно сведениям из литературы [5–18], часто возникает несоответствие между смоделированной и экспериментальной эффективностью. В первую очередь это связано с чувствительностью расчетов методом Монте-Карло к спецификациям геометрии детектора. Размеры, предоставленные изготовителем, соответствуют системе детектирования для комнатной температуры, а при низких температурах в механическом кронштейне кристалла возникают сжатия, что в свою очередь приводит к изменениям в конфигурации детектора. Кроме этого, существует неопределенность толщины нечувствительного (мертвого) слоя, расстояния от крышки детектора до кристалла и т. д.

Мы придерживались следующей методики при подборе параметров. Во-первых, данные, представленные поставщиком, не менялись. Во-вторых, было два вида параметров: неизменные – такие, значение которых не влияло на эффективность и поэтому они не менялись, и изменяемые параметры, значение которых варьировалось с некоторым шагом, обычно ± 1 мм. В-третьих, критерием удовлетворительной точности было не превышающее 5 % расхождение между рассчитанной в MCNP и экспериментальной эффективностью регистрации для различных расстояний «детектор – источник излучения».

Результаты и обсуждение

Используя исходные данные о детекторе, с помощью программы MCNP5 была смоделирована система «моноэнергетический источник – германиевый детектор». На рис. 4 приведен один из вариантов модели детектора, построенный с помощью программы MCNP5.

Модели отличались геометрическими параметрами и толщиной мертвого слоя детектора. Для детектора обязательно нужно учитывать мертвый слой на поверхности кристалла – нечувствительный к гамма-квантам электропроводящий слой, служащий для создания электрического контакта

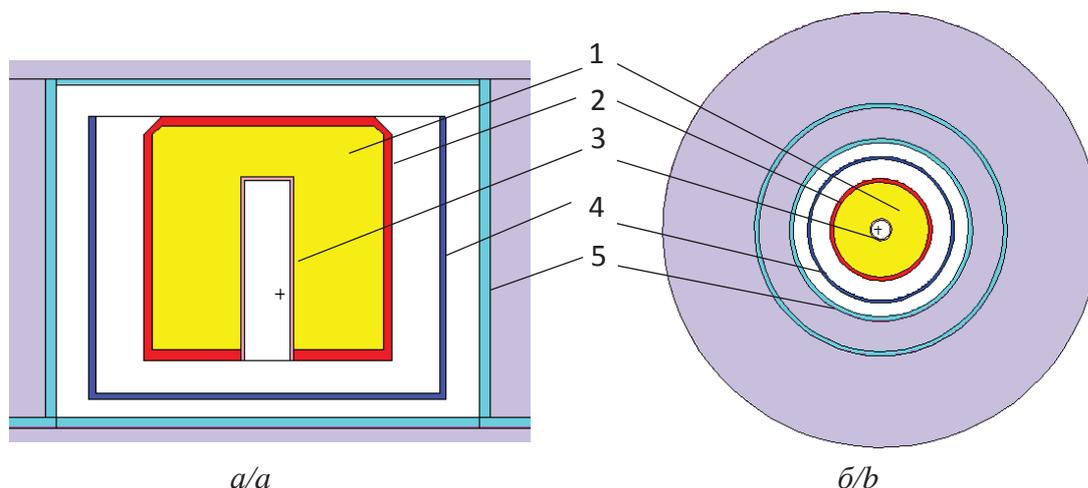


Рис. 4. Модель детектора, построенная с помощью программы MCNP5 (а) вертикальный разрез, (б) горизонтальный разрез: 1) кристалл из особо чистого германия; 2) мертвый слой; 3) контактный слой из бора; 4) алюминиевая стенка кронштейна; 5) стенка крышки детектора

Fig. 4. Detector model, built with the help of epy MCNP5 program (a) vertical section (b) horizontal section: 1) crystal of high purity germanium; 2) dead layer; 3) contact layer of boron; 4) aluminum wall of mount cup; 5) wall of the end cap

с полупроводниковым кристаллом. В экспериментах с тяжелыми заряженными частицами толщина этого слоя имеет большое значение, так как в мертвом слое частица может потерять значительную часть своей энергии. Если частицы будут падать в детектор под разными углами, то их потери будут неодинаковыми, что приведет к ухудшению разрешения. Для всех вариантов модели детектора без «мертвого слоя» эффективность MCNP оказалась выше экспериментальных значений в среднем на 30 %, что указывает на необходимость задания мертвого слоя.

Таблица 3. Изменяемые параметры детектора (влияние радиуса кристалла)

Table 3. Variable parameters of the detector (effect of the crystal radius)

Буквенное обозначение Lettering	Значение, мм/Value, mm	
	1 вариант 1 variant	2 вариант 2 variant
M	2	2
N*	2,5	1
O	2,2	2,2
J	2	2
D	34,8	34,8
Рассчитанный объем кристалла, см ³ Estimated volume of the crystal, cm ³	60,0642	62,814

Для сравнения с имеющимися экспериментальными значениями [19] был задан источник с различными энергиями гамма-квантов. В ходе расчетов было выявлено влияние параметров кристалла детектора на результаты. Определялось, как изменение радиуса (через изменение толщины мертвого бокового слоя) влияет на угол наклона кривой эффективности. Исходные изменяемые параметры детектора приведены в табл. 3. Расстояние

до источника было задано равным 50 мм. Расчетные и экспериментальные значения эффективности регистрации представлены на рис. 5.

Анализ графиков показывает, что при увеличении радиуса детектора (уменьшении бокового мертвого слоя с 2,5 до 1 мм) расчетная кривая эффективности лучше совпадает с экспериментальной кривой, особенно для энергий от 121,73 до 661,65 кэВ. Можно сделать вывод, что радиус детектора в большей степени влияет на угол наклона кривой эффективности в области низких энергий.

На рис. 6 приведена схема, взятая из [20], на которой демонстрируется, как энергия гамма-квантов влияет на глубину проникновения в кристалл детектора.

Как показано на рис. 6, около 14 % гамма-квантов с энергией 185,7 кэВ поглощается в мертвом слое (900 мкм) детектора, в то время как для энергии 1001,03 кэВ поглощается до 9 % гамма-квантов в мертвом слое такой же толщины. До 9,4 мм глубины детектора (начало технологического отверстия детектора) поглощается уже 69 % от всех гамма-квантов с энергией 185,7 кэВ против 46 % для энергии 1001,03 кэВ.

Далее было определено, как влияет на эффективность изменение глубины технологического отверстия. Исходные изменяемые параметры детектора приведены в табл. 4. Расстояние до источника составило 250 мм. Результаты расчетов представлены на рис. 7.

Анализ графиков показывает, что с увеличением глубины технологического отверстия с 24,3 до 39,5 мм угол наклона кривой эффективности заметно изменяется в области высоких энергий.

При выполнении математического моделирования были выполнены различные корректировки для лучшего приближения расчетных значений

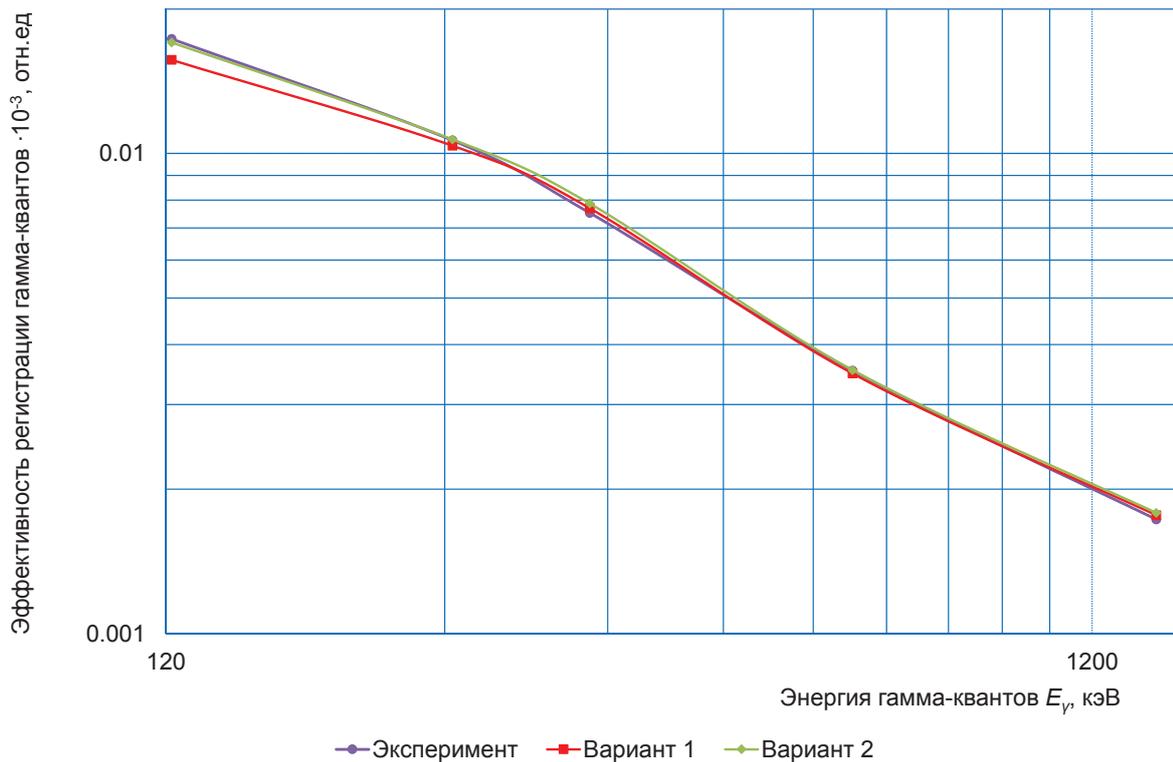


Рис. 5. Сравнение данных по эффективности регистрации гамма-квантов

Fig. 5. Comparison of the data on the effectiveness of gamma rays

эффективности к экспериментальным значениям. Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными значениями для различных расстояний от источника до детектора. Была задача добиться расхождения менее 5%. Параметры детектора приведены в табл. 5.

Таблица 4. Изменяемые параметры детектора (влияние глубины отверстия)

Table 4. Variable parameters of the detector (hole depth effect)

Буквенное обозначение Lettering	Значение, мм/Value, mm		
	1 вариант 1 variant	2 вариант 2 variant	3 вариант 3 variant
M	2	2	2
N	1,7	1,7	1,7
O	1,7	1,7	1,7
J	1,7	1,7	1,7
D*	24,8	34,8	39,8
Рассчитанный объем кристалла, см ³ Estimated volume of the crystal, cm ³	60,4614	59,676	59,2833

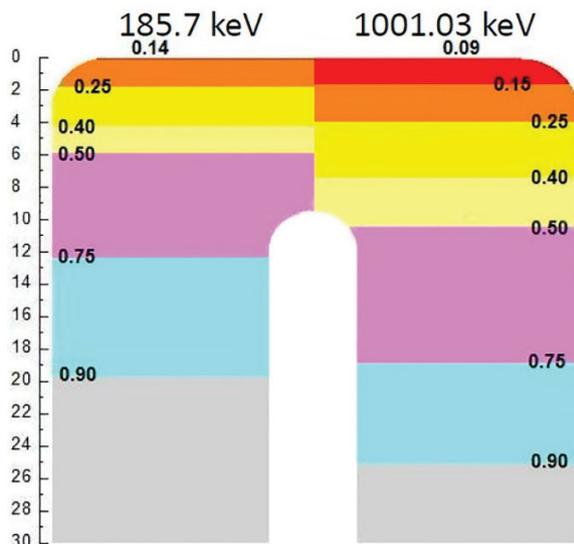


Рис. 6. Схема поглощения гамма-квантов на разных слоях в детекторе для энергии 185,7 кэВ (левая сторона) и 1001,03 кэВ (правая сторона)

Fig. 6. Scheme of absorption of gamma rays in different layers of the detector for energy 185,7 keV (left side) and 1001,03 keV (right side)

Далее по формуле (2) было рассчитано относительное отклонение расчетных и экспериментальных значений для каждой энергии:

$$R = |x_1 - x_2| / x_1 \times 100\%, \quad (2)$$

где R – относительное отклонение; x_1 – значение экспериментальной эффективности регистрации гамма-квантов; x_2 – значение рассчитанной эффективности регистрации гамма-квантов.

В качестве примера в табл. 6 приведены результаты расчета эффективности и оценка точности моделирования для расстояния 200 мм от детектора.

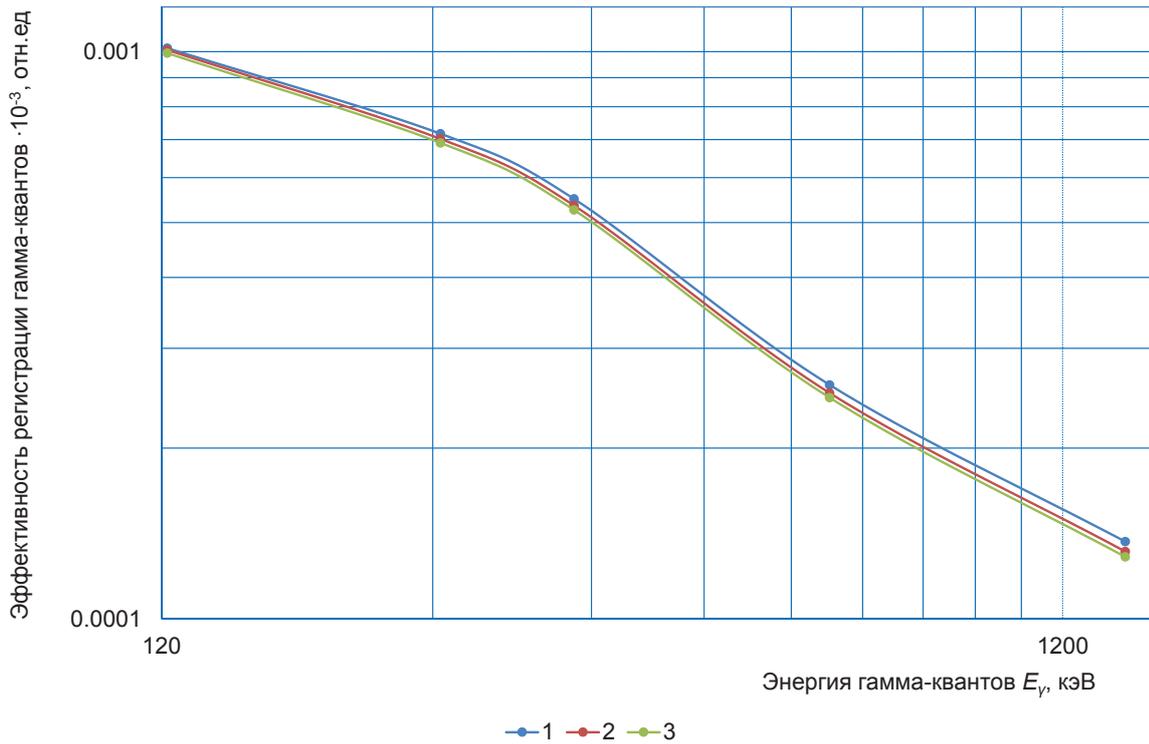


Рис. 7. Сравнение данных по эффективности регистрации гамма-квантов

Fig. 7. Comparison of the data on the effectiveness of gamma rays

Таблица 5. Изменяемые параметры детектора (скорректированные данные)

Table 5. Variable parameters of the detector (adjusted data)

Буквенное обозначение Lettering	Значение, мм/Value, mm		
	1 вариант 1 variant	2 вариант 2 variant	3 вариант 3 variant
M	2	2	2
N	1	1	1
O	2,2	2,2	2,2
J	1,7	1,7	1,7
D*	34,3	24,3	39,3
Рассчитанный объем кристалла, см ³ Estimated volume of the crystal, cm ³	62,52	63,68	62,50

Таблица 6. Сравнение значений эффективности регистрации гамма-квантов

Table 6. Comparison of data on the effectiveness of gamma rays

Энергия гамма-квантов, E_γ , кэВ Gamma-ray energy E_γ , keV	Эффективность регистрации гамма-квантов, $\varepsilon \cdot 10^{-3}$, отн. ед. Efficiency of detection of gamma rays, $\varepsilon \cdot 10^{-3}$, rel. un.				Относительная погрешность, % Relative error, %		
	Эксперимент Experiment	Расчетные данные Calculated data			1	2	3
		1	2	3			
121,73	0,179	0,175	0,176	0,172	2,5	1,8	3,7
244,69	0,119	0,118	0,120	0,116	0,7	1,2	2,3
344,27	0,0835	0,090	0,092	0,088	7,3	10,3	5,5
661,65	0,0405	0,041	0,042	0,040	1,6	4,9	0,2
1407,95	0,021	0,021	0,022	0,021	2,3	7,0	0,2

В целом результаты расчетов для всех вариантов моделей достаточно близко повторяют экспериментальные значения. Анализируя графики расчетных и экспериментальных данных, можно отметить, что отклонения расчетных значений эффективности регистрации от экспериментальных в области наиболее важных энергий гамма-квантов для первого варианта не превышают 7,3 %, 10,3 % для второго варианта и 5,5 % для третьего варианта. Можно сделать вывод, что третий вариант расчетов лучше моделирует отклик детектора.

Такое различие может быть связано с тем, что в третьем варианте модели детектора увеличена глубина технологического отверстия, объем кристалла составляет 62,5 см³, что, вероятно, наиболее близко к реальному параметру. На рис. 8 для третьего варианта расчетов приведены графики расчетных и экспериментальных значений эффективности регистрации гамма-квантов, когда точечные источники располагались на расстояниях 50, 100, 150, 200, 250 и 350 мм от торцевой крышки детектора.

Можно сделать вывод, что для данного варианта лучше удастся воспроизвести экспериментальную эффективность регистрации при относительно больших расстояниях (от 200 до 350 мм) от источника до детектора. При меньших же расстояниях ($d=50$ мм) расхождение более существенно и достигает приблизительно 10 %. Это говорит о том, что необходимо продолжить работу по совершенствованию модели детектора.

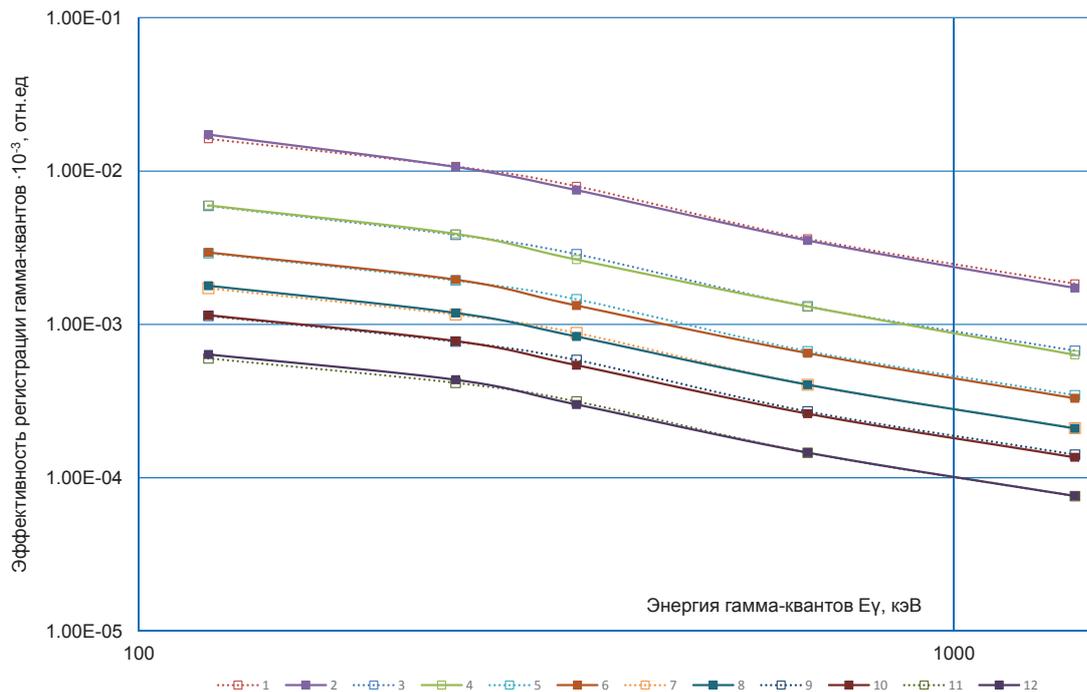


Рис. 8. Сравнение данных по эффективности регистрации гамма-квантов (мм): 1) расчет 50; 2) эксперимент 50; 3) расчет 100; 4) эксперимент 100; 5) расчет 150; 6) эксперимент 150; 7) расчет 200; 8) эксперимент 200; 9) расчет 250; 10) эксперимент 250; 11) расчет 350; 12) эксперимент 350

Fig. 8. Comparison of the data on the effectiveness of gamma rays (mm): 1) calculation 50; 2) experiment 50; 3) calculation 100; 4) experiment 100; 5) calculation 150; 6) experiment 150; 7) calculation 200; 8) experiment 200; 9) calculation 250; 10) experiment 250; 11) calculation 350; 12) experiment 350

Заключение

Проведено моделирование полупроводникового детектора из ОЧГ с помощью метода Монте-Карло. В ходе проведенных расчетов выявлено влияние некоторых параметров кристалла детектора на результаты расчета эффективности регистрации гамма-квантов различных энергий:

- радиус детектора в большей степени влияет на угол наклона кривой эффективности в области низких энергий;
- эффект «мертвого слоя» будет иметь большее значение для низкоэнергетических гамма-квантов, в то время как эффект глубины технологического отверстия будет иметь большее значение для гамма-квантов с энергией выше 1,0 МэВ;
- с увеличением глубины технологического отверстия угол наклона кривой эффективности

меняется в большей степени в области высоких энергий. Таким образом, можно сделать вывод о существенном влиянии геометрических параметров кристалла на эффективность регистрации детектора.

Изменяя геометрические размеры кристалла детектора, которые оказывают значительное влияние на эффективность детектора, можно добиться максимального совпадения расчетных и экспериментальных значений эффективности регистрации детектора. Использование метода Монте-Карло полезно при моделировании системы «источник–детектор» для случаев анализа радиоактивных поглощающих образцов с нестандартной геометрией, когда форма и плотность анализируемого образца и калибровочного источника различаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Твердотельные полупроводниковые детекторы. URL: http://rad-stop.ru/25-tverdotelnyie-poluprovodnikovyye-detektoriy/#.WWWhcl_kROWk (дата обращения: 20.05.2017).
2. Germanium Detectors. User's Manual. Ge-USR 9/96. Canberra Industries, Inc., 800 Research Parkway, Meriden, CT 06450. URL: <http://www.canberra.com> (дата обращения: 15.05.2017).
3. Inspector Volume Two. Руководство пользователя спектрометрической системой Genie-PC: S404-USR. – 2014. – 271 с.
4. Briesmeister J.F. MCNP – a General Monte Carlo N-Particle Transport Code. – Los Alamos: LANL, 2000. – 319 p.
5. Gaussian Energy Broadening Function of an HPGe Detector in the Range of 40keV to 1.46MeV / E.E. Zadeh, S.A.H. Feghhi, E. Bayat, G.H. Roshani // Journal of Experimental Physics. – 2014. – Article ID 623683. – P. 4–5.
6. Validation of a NaI (Tl) detector's model developed with MCNP-X code / C.M. Salgado, L.E.B. Brandao, R. Schirru, C.M.N.A. Pereira, C.C. Conti // Progress in Nuclear Energy. – 2015. – V. 59. – P. 19–25.
7. Hau I.D., Russ W.R., Bronson F. MCNP HPGe detector benchmark with previously validated Cyltran model // Applied Radiation and Isotopes. – 2009. – V. 67. – P. 711–715.

8. Bosen J., Agren G., Johansson L.A. Detailed investigation of HPGe detector response for improved Monte Carlo efficiency calculations // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2008. – V. 587. – P. 304–314.
9. Koleska M., Viererbl L., Marek M. Development of the MCNPX model for the portable HPGe detector // Radiation Physics and Chemistry. – 2014. – V. 104. – P. 351–354.
10. Efficiency simulation of a HPGe detector for the environmental radioactivity laboratory/CDTN using a MCNP-gamma vision method / D.C. Vasconcelos, C. Pereira, S. Gallardo, Z. Rocha, T.O. Santos // 2011 International Nuclear Atlantic Conference. – MG, Brazil, 2011. – P. 17–24.
11. Hahin D., Unlii K. Modeling a gamma spectroscopy system and predicting spectra with Geant-4 // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2009. – V. 282. – № J. – P. 167–172.
12. Medhat M.E., Wang Y. Assessment of the suitability of Monte Carlo simulation for activity measurements of extended sources // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2014. – V. 300. – № J. – P. 1005–1011.
13. Influence of the geometrical characteristics of an HPGe detector on its efficiency / M.J. Vargas, A.F. Timon, N.C. Diaz, D.P. Sanchez // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2002. – V. 253. – № 3. – P. 439–443.
14. Determining the efficiency of a broad-energy HPGe detector using Monte Carlo simulations / R., Britton J. Burnett, A. Davies, P.H. Regan // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2013. – V. 295. – № J. – P. 2035–2041.
15. Analysis of the influence of germanium dead layer on detector calibration simulation for environmental radioactive samples using the Monte Carlo method / J. Rodenas, A. Pascual, I. Zarza, V. Serradell, J. Ortiz, L. Ballesteros // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A. – 2003. – V. 496. – P. 390–399.
16. Novotny S., To D. Characterization of a high-purity germanium (HPGe) detector through Monte Carlo simulation and nonlinear least squares estimation // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2015. – V. 304. – P. 751–761.
17. Characterization of HPGe gamma spectrometers by GEANT4 Monte Carlo simulations / L. Szentmiklosi, T. Belgya, B. Maroti, Z. Kis // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2014. – V. 300. – P. 553–558.
18. Keyser R.M., Hensley W.K. Efficiency of germanium detectors as a function of energy and incident geometry: Comparison of measurements and calculations // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2005. – V. 264. – P. 259–264.
19. Калибровка спектрометра. Протокол 13–240–02/88784 от 06.06.2016. – Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК, 2016. – 3 с.
20. Zidan W.I. Refining of a Mathematical Model for an HPGe Detector // Journal of Nuclear and Particle Physics. – 2015. – V. 5 (2). – P. 30–37.

Поступила 29.05.2017 г.

Информация об авторах

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

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

Прозорова И.В., начальник группы лаборатории физики реакторных установок Института атомной энергии НЯЦ РК.

Прозоров А.А., студент Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 539.1.074

MODELING SEMICONDUCTOR DETECTOR OF ESPECIALLY PURE GERMANIUM

Yury V. Aleynikov¹,
aleinikov@nnc.kz

Yury A. Popov¹,
Popov@nnc.kz

Irina V. Prozorova¹,
Prozorova@nnc.kz

Alexandr A. Prozorov²,
prozorov_a_a@mail.ru

¹ Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan,
10, Krasnoarmeyskaya Street, Kurchatov, 711100, Republic of Kazakhstan.

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

Relevance of the work. One of the major contemporary problems is the development of geo-ecology background radiation control methods and means of natural and technogenic origin on the basis of high-precision portable semiconductor detectors. The known methods for calculating such detectors by the Monte Carlo method is widely used in the field of radiation safety: radiation protection, calculations of nuclear reactors, screening and modeling of the detectors; the radiation parameters of the field of ionizing radiation sources are calculated. The MCNP program implementing the Monte Carlo method is a modeling tool for radiative transfer, mainly in those cases when the measurement are difficult or practically feasible. In the research the MCNP program was used for simulating the detector of high-purity germanium Ge (Li) and the method to improve the determination of the response function for this type of detector. The results obtained in the simulation are accurate enough, there is a good match between the model and the experimental data.

The main aim of the research is to develop the computational model GC1020 type germanium detector for solving assessment detector efficiency.

Research methods: construction and adjustment of the geometric and physical model of the detector; alternative calculations to determine the effectiveness of the registration detection monoenergetic gamma radiation using the MCNP5 program.

Results. Modeling the high-purity germanium detector using the Monte Carlo method is important for the efficiency of registration in the case of samples with irregular geometry, and for large samples, where the effectiveness is difficult to assess experimentally. The paper introduces the calculation of the efficiency of a semiconductor detector which is widely used in our laboratory for various samples that were performed for the geometry of a point source; detector parameters were optimized with 5 % error between the MCNP and experimental performance at different distances from the detector. The optimized geometry of the detector was later confirmed by the effective transfer to other geometry.

Key words:

Source, efficiency of gamma radiation detection, semiconductor detector, simulation by the Monte Carlo method, optimization of a detector geometry.

REFERENCES

1. *Tverdotelnye poluprovodnikovye detektory* [Solid-state semiconductor detectors]. Available at: http://rad-stop.ru/25-tverdotelnye-poluprovodnikovyye-detektory/#.WWHcl_kROWk (accessed 20 May 2017).
2. *Germanium Detectors. User's Manual. Ge-USA 9/96*. Canberra Industries, Inc., 800 Research Parkway, Meriden, CT 06450. Available at: <http://www.canberra.com> (accessed 15 May 2017).
3. Inspector Volume Two. Spectrometric system user guide Genie-PC: S404-USA. – 2014. – 271 p.
4. Briesmeister J.F. *MCNP – a General Monte Carlo N-Particle Transport Code*. Los Alamos, LANL Publ., 2000. 319 p.
5. Zadeh E.E., Feghhi S.A.H., Bayat E., Roshani G.H. Gaussian Energy Broadening Function of an HPGe Detector in the Range of 40keV to 1.46MeV. *Journal of Experimental Physics*, 2014, Article ID 623683, pp. 4–5.
6. Salgado C.M., Brandao L.E.B., Schirru R., Pereira C.M.N.A., Conti C.C. Validation of a NaI (Tl) detector's model developed with MCNP-X code. *Progress in Nuclear Energy*, 2015, vol. 59, pp. 19–25.
7. Hau I.D., Russ W.R., Bronson F. MCNP HPGe detector benchmark with previously validated Cyltran model. *Applied Radiation and Isotopes*, 2009, vol. 67, pp. 711–715.
8. Boson J., Agren G., Johansson L.A. Detailed investigation of HPGe detector response for improved Monte Carlo efficiency calculations. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2008, vol. 587, pp. 304–314.
9. Koleska M., Viererbl L., Marek M. Development of the MCNPX model for the portable HPGe detector. *Radiation Physics and Chemistry*, 2014, vol. 104, pp. 351–354.
10. Vasconcelos D.C., Pereira C., Gallardo S., Rocha Z., Santos T.O. Efficiency simulation of a HPGe detector for the environmental radioactivity laboratory/CDTN using A MCNP-gamma vision method. *2011 International Nuclear Atlantic Conference*. MG, Brazil, 2011. pp. 17–24.
11. Hahin D., Unlii K. Modeling a gamma spectroscopy system and predicting spectra with Geant-4. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2009, vol. 282, no. J, pp. 167–172.
12. Medhat M.E., Wang Y. Assessment of the suitability of Monte Carlo simulation for activity measurements of extended sources.

- Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2014, vol. 300, no. J, pp. 1005–1011.
13. Vargas M.J., Timon A.F., Diaz N.C., Sanchez D.P. Influence of the geometrical characteristics of an HpGe detector on its efficiency. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2002, vol. 253, no. 3, pp. 439–443.
 14. Britton R., Burnett J., Davies A., Regan P. H. Determining the efficiency of a broad-energy HPGe detector using Monte Carlo simulations. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2013, vol. 295, no. J, pp. 2035–2041.
 15. Rodenas J., Pascual A., Zarza L., Serradell V., Ortiz J., Ballesteros L. Analysis of the influence of germanium dead layer on detector calibration simulation for environmental radioactive samples using the Monte Carlo method. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A*, 2003, vol. 496, pp. 390–399.
 16. Novotny S., To D. Characterization of a high-purity germanium (HPGe) detector through Monte Carlo simulation and nonlinear least squares estimation. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2015, vol. 304, pp. 751–761.
 17. Szentmiklosi L., Belgya T., Maroti B., Kis Z. Characterization of HPGe gamma spectrometers by GEANT4 Monte Carlo simulations. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2014, vol. 300, pp. 553–558.
 18. Keyser R.M., Hensley W.K. Efficiency of germanium detectors as a function of energy and incident geometry: Comparison of measurements and calculations. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2005, vol. 264, pp. 259–264.
 19. *Kalibrovki spektrometra* [Calibration of the spectrometer]. Protocol № 13–240–02/88784 from 06.06.2016. Branch IAE NNC RK, 2016. 3 p.
 20. Zidan W.I. Refining of a Mathematical Model for an HPGe Detector. *Journal of Nuclear and Particle Physics*, 2015, vol. 5 (2), pp. 30–37.

Received: 29 May 2017.

Information about the authors

Yury V. Aleynikov, head of the laboratory, Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan.

Yury A. Popov, deputy head of the laboratory, Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan.

Irina V. Prozorova, head of the group of the laboratory, Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan.

Alexandr A. Prozorov, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 544.77.032.1:62–837

ПРИГОТОВЛЕНИЕ И КОРРЕКЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БУРОВОГО РАСТВОРА ТЕХНОЛОГИЕЙ И ОБОРУДОВАНИЕМ ВСМА

Данекер Валерий Аркадьевич¹,
vad@tpu.ru

Рикконен Сергей Владимирович²,
rikk2@yandex.ru

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

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

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки высокоэффективного и ресурсосберегающего оборудования, используемого для приготовления и коррекции бурового раствора в процессе бурения нефтяных и газовых скважин. Одним из путей решения данной проблемы является использование новой технологии виброструйной магнитной активации растворов и жидкостей. Указанная технология реализуется погружным электромагнитным преобразовательным устройством колебательного типа, работающим в резонансном или близких к нему режимах. Резонансный режим работы такого устройства обеспечивает высокое энергетическое воздействие на структуру бурового раствора в локальной зоне активации, что приводит к более высокой степени диспергации частиц дисперсной фазы. При этом резонансный режим работы электромагнитного преобразовательного устройства характеризуется наименьшим уровнем потребления электрической энергии.

Цель работы: получение и сравнение результатов исследований основных показателей качества буровых растворов, приготовленных на традиционных механических центробежных мешалках и на оборудовании виброструйной магнитной активации.

Методы исследований. Исследования проводились в лабораторных и натуральных условиях с использованием экспериментального лабораторного и промышленно выпускаемого оборудования. Оценка дисперсности приготовленных буровых растворов проводилась седиментационным методом. Энергосбережение оценивалось расчётным методом по длительности работы оборудования с установленной электрической мощностью.

Результаты. Основные показатели качества бурового раствора, приготовленного на оборудовании виброструйной магнитной активации, существенно выше, чем качество бурового раствора, приготовленного на традиционно применяемом оборудовании, что подтверждается меньшими размерами частиц дисперсной фазы. Время приготовления и коррекции бурового раствора при использовании оборудования виброструйной магнитной активации в несколько раз меньше по сравнению с традиционными механическими центробежными мешалками.

Ключевые слова:

Буровой раствор, дисперсность, активация, резонанс, ресурсоэффективность, качество.

Введение

Повышение ресурсоэффективности работ при бурении нефтяных и газовых скважин является актуальной задачей, особенно в условиях перехода на добычу трудноизвлекаемых запасов углеводородного сырья. Важным показателем успешности проведения указанных работ является обеспечение качества бурового раствора. Данное обстоятельство в равной степени относится как к процессу приготовления, так и к процессу коррекции показателей бурового раствора для своевременной реакции на возникающие изменения условий бурения.

Одним из важных показателей бурового раствора, являющегося дисперсной системой, является его устойчивость, характеризующая распределение частиц дисперсной фазы в объёме дисперсной среды, и их дисперсность. К основным способам диспергирования частиц дисперсной фазы в среде, которой в большинстве случаев приготовления буровых растворов является вода, можно отнести гидродинамическое, ультразвуковое, центробежное, вибрационное, пневматическое перемешивание [1–14]. Для усиления процесса диспергирования

используют дополнительные эффекты, такие как наложение электрического или магнитного полей, применение ПАВ и др. [15, 16].

Наиболее распространённым способом проведения завершающего этапа приготовления и коррекции буровых растворов при разведке и строительстве скважин является центробежное перемешивание, реализуемое лопастными мешалками типа ПЛМ, ПБРТ и др. [17]. Диспергирование частичек глины происходит под действием вращения лопастей мешалки с максимальной скоростью перемешивания до (3,0–3,5) м/с, наблюдаемой по периферии траектории вращения лопастей. При этом затраты электроэнергии составляют до 2,0 кВт на приготовление одного кубического метра раствора. Дисперсность бурового раствора, приготовленного данным способом, характеризуется тем, что частицы дисперсной фазы с размером более 10 мкм составляют более 50 %. Следует отметить, что приведённые показатели процесса приготовления бурового раствора не в полной мере удовлетворяют современным требованиям, как по энергоёмкости, так и по качественным показателям самого раствора. Высокая энергоёмкость и длительность

обработки для приобретения раствором необходимых показателей при корректировке с использованием указанного выше оборудования также далеки от возможно достижимых показателей.

Таким образом, исследование и поиск новых подходов к реализации процессов приготовления и корректировки параметров буровых растворов и в настоящее время актуальны.

Одним из возможных путей решения задачи повышения ресурсоэффективности процессов приготовления и коррекции бурового раствора является использование технологии и оборудования виброструйной магнитной активации (ВСМА) растворов [18–20]. В основе технологии ВСМА лежит многокомпонентное физическое воздействие на сложные жидкие системы, создаваемое погружным резонансным электромагнитным устройством (ПРЭМУ) колебательного типа. Принцип работы ПРЭМУ поясняется рис. 1. Возмущающая сила ПРЭМУ колебаний создаётся электромагнитным приводом. При подаче переменного напряжения на обмотку электромагнитного привода рабочий орган ПРЭМУ (активатор) под действием электромагнитной силы совершает в жидкой среде колебательные движения. При колебательном движении активатора за счёт разности гидравлических сопротивлений формируется затопленная струя. Определённым подбором значений массы активатора и жёсткости пружинного подвеса можно обеспечить резонансный режим работы ПРЭМУ. Работа устройства в резонансном или близких к нему режимах позволяет получить высокие значения амплитуды колебаний активатора и, соответственно, механической работы в зоне активации при минимальном потреблении электроэнергии. Зона активации растворов ПРЭМУ, размеры которой определяются размерами активатора и в которой происходит диспергация частиц дисперсной фазы, характеризуется следующими параметрами:

- сдвиговое воздействие со скоростью более 10^4 с^{-1} ;
- ускорение рабочего органа до 100 g;
- скорость затопленных струй до 20 м/с;
- индукция магнитного поля до 0,7 Тл;
- перепад давления до 3 атм.

Одновременное действие перечисленных факторов с высокими индивидуальными значениями позволяет сделать предположение о возможности реализации оборудованием ВСМА процессов приготовления и коррекции бурового раствора с более высокими качественными показателями по сравнению с механическими мешалками.

Исследования

С целью определения перспективности применения оборудования ВСМА для приготовления бурового раствора были проведены сравнительные лабораторные исследования степени диспергации частиц дисперсной фазы при использовании традиционных, наиболее широко применяемых устройств центробежного типа и устройств ВСМА.

Лабораторная лопастная механическая мешалка М-1, используемая при проведении экспериментов, имеет следующие характеристики:

- объём обрабатываемой жидкости 1 л;
- мощность двигателя 0,2 кВт;
- скорость вращения мешалки 1000 об/мин;
- диаметр лопастей мешалки 0,06 м;
- количество лопастей 4 шт.

Основным фактором диспергирующего воздействия механических мешалок является линейная скорость на окончании лопастей. Линейная скорость на периметре лопастей лабораторной механической мешалки в соответствии с приведёнными выше данным составляет 3,93 м/с, что несколько превышает аналогичный параметр для некоторых промышленных образцов мешалок 3,4 м/с.

Технические характеристики лабораторной установки ВЛ-1, реализующей технологию ВСМА, имеют следующие значения:

- объём обрабатываемой жидкости 1 л;
- мощность электропривода 0,03 кВт;
- амплитуда колебаний активатора 0,006 м;
- частота колебаний активатора 50 Гц;
- количество активаторов 1 шт.;
- габариты активатора (длина, ширина) 0,08×0,06 м.

Степень диспергации оценивалась по распределению размеров частиц дисперсной фазы, определяемых седиментационным методом. В качестве дисперсной фазы использовалась глина Долматовского карьера. Для усиления эффекта диспергации использовались ПАВ: карбонат натрия Na_2CO_3 и гидроксид натрия NaOH . Длительность обработки определялась по готовности бурового раствора, оцениваемой визуально. Также проводились измерения значений динамического напряжения сдвига (ДНС) для дисперсных систем, приготовленных на указанных выше установках.

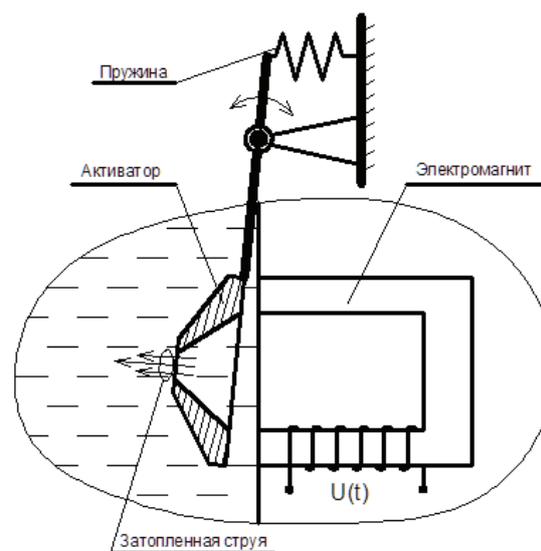


Рис. 1. Схема работы ПРЭМУ

Fig. 1. Diagram of SREMD (submersible resonance electromagnetic device) operation

Результаты исследований

Лабораторные исследования выявили, что время работы используемого оборудования, обеспечивающего готовность бурового раствора, существенно отличается. Время работы механической мешалки М-1 для приготовления бурового раствора сравнительно одинакового качества составляет не менее 6 часов, тогда как для установки ВЛ-1 это время составляет не более 2 часов. При этом затраты электроэнергии составляют для установки М-1 1,2 кВт·ч, а для установки ВЛ-1 всего 0,06 кВт·ч.

На рис. 1 приведены графики изменения ДНС в зависимости от времени хранения для буровых растворов, приготовленных на лабораторных установках М-1 и ВЛ-1. Как видно из представленных на рис. 2 данных, значения ДНС бурового раствора, приготовленного на установке ВЛ-1, во всём диапазоне времени хранения значительно выше, чем для установки М-1. Более высокие значения ДНС бурового раствора свидетельствуют о его лучшей способности выносить шлам на поверхность при бурении скважин. Следует отметить, что достаточное значение ДНС для эффективного удержания шлама буровой раствор, приготовленный на установке ВЛ-1, приобретает уже после 30 минут после приготовления, тогда как для раствора, приготовленного на установке М-1, аналогичное явление наблюдается только по истечении 3 часов после его приготовления.

На рис. 3–5 приведены результаты оценки дисперсности растворов, полученных на лабораторных установках М-1 и ВЛ-1.

Для бурового раствора, приготовленного на установке М-1 (рис. 3) частицы глины с радиусом от 8 до 13 мкм составляют более 90 % от общего количества. Время приготовления такого раствора на установке М-1 составляет не менее 6 часов.

Использование установки ВЛ-1 для приготовления бурового раствора позволяет получать частички глины с преобладающими радиусами от 2 до 7 мкм в течение уже 2 часов работы установки (рис. 4).

Из представленных выше данных следует заключить, что качество бурового раствора, приготовленного на установке ВЛ-1 и имеющего более мелкие размеры частиц дисперсной фазы, несомненно, выше, чем для раствора, приготовленного на установке М-1.

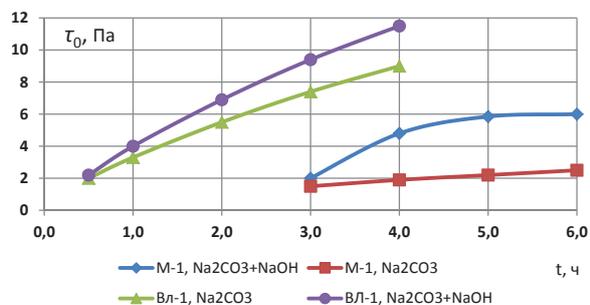


Рис. 2. Изменение значений динамического напряжения сдвига

Fig. 2. Changing the values of shift dynamic pressure

К факторам, обеспечившим полученный позитивный эффект, очевидно, следует отнести комплекс физических воздействий технологии ВСМА, действующих на дисперсную систему и обеспечивающих в совокупности синергетический эффект: высокие сдвиговые скорости, магнитное и декомпрессионное воздействия. Последнее физическое воздействие с большой степенью вероятности предполагает наличие факторов кавитационного процесса.

Совместное использование ПАВ карбоната натрия и гидроксида натрия при приготовлении бурового раствора на установке ВЛ-1 позволило сократить время приготовления ещё в два раза (рис. 5). Причём следует отметить, что зона приоритетного распределения частиц глины смещается в зону от 2 до 4 мкм, что свидетельствует о более высоком качестве бурового раствора. Значения ДНС буровых растворов, приготовленных на установке ВЛ-1, как для отдельного, так и для совместного использования ПАВ отличаются незначительно.

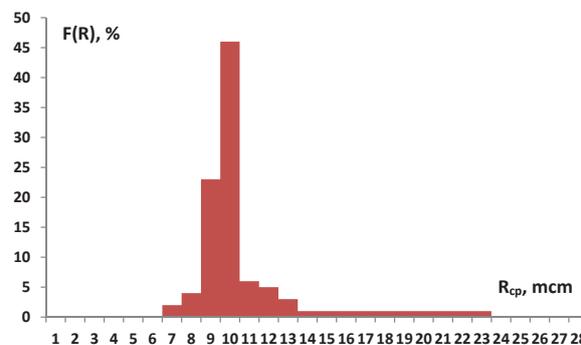


Рис. 3. Распределение частиц глины раствора на мешалке М-1 (обработка 6 ч, Na₂CO₃)

Fig. 3. Mud particle distribution in solution on the stirrer М-1 (processing time is 6 hrs, Na₂CO₃)

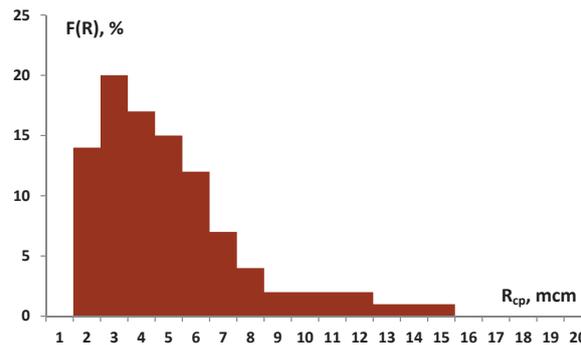


Рис. 4. Распределение частиц глины раствора на мешалке ВЛ-1 (обработка 2 ч, Na₂CO₃)

Fig. 4. Mud particle distribution in solution on the stirrer ВЛ-1 (processing time is 2 hrs, Na₂CO₃)

Оценка эффективности применения оборудования ВСМА при коррекции буровых растворов проводилась в процессе утяжеления раствора с использованием промышленных образцов оборудования ВСМА вибраторов типа ВСП-1,0 и штатных мешалок на блоке-модуле БМ12 одной из скважин морского базирования. Вибратор ВСП-1,0 имеет

полный аналог – вибратор ВЭМА-0,3, также выпускаемый промышленно.

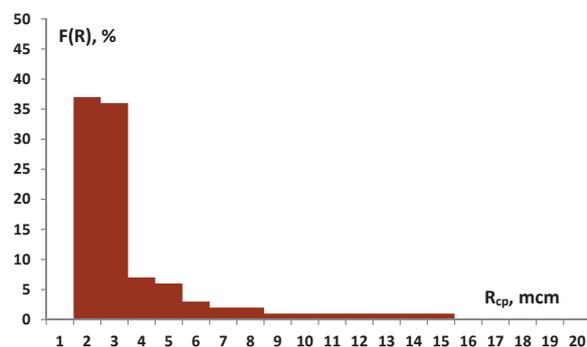


Рис. 5. Распределение частиц глины раствора на мешалке ВЛ-1 (обработка 1 ч, $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NaOH}$)

Fig. 5. Mud particle distribution in solution on the stirrer ВЛ-1 (processing time is 1 h, $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NaOH}$)

Испытания проводились в процессе перевода (коррекции) бурового раствора плотностью 1,16–1,19 г/см³ на буровой раствор плотностью 1,7–1,73 г/см³ в двух ёмкостях объёмом 32 м³ каждая. Процесс утяжеления бурового раствора осуществлялся из расчёта одна тонна барита на один кубический метр раствора. В испытуемой ёмкости к двум штатным механическим мешалкам дополнительно были установлены четыре вибратора ВСП-1,0. В контрольной ёмкости использовались две штатные механические мешалки. Установленная суммарная мощность двух механических мешалок составляет 15,0 кВт. Суммарная мощность четырёх ВСП-1,0 составляет 1,2 кВт.

Максимальная линейная скорость вращения лопастей штатной механической мешалки равна 3,14 м/с. Скорость потока бурового раствора при использовании вибратора ВСП-1,0 достигает значений до 4 м/с.

Результаты процесса утяжеления бурового раствора в двух ёмкостях приведены в таблице.

Из данных, приведённых в таблице, следует сделать два важных вывода. Во-первых, при совместном использовании штатных мешалок и вибраторов ВСП-1,0 существенно сократилось время коррекции параметров бурового раствора. Сокращение составило более 2 часов. Указанное сокращение времени коррекции привело к существенному снижению затрат электроэнергии. Затраты электроэнергии в контрольной ёмкости составили 90 кВт·ч, а для испытательной ёмкости – 68,0 кВт·ч. Во-вторых, качество бурового раствора после его коррекции в испытательной ёмкости значительно выше. Об этом свидетельствует значение условной вязкости бурового раствора, которое для испытательной ёмкости в 1,8 раза меньше, чем для контрольной ёмкости. Также отмечается некоторое

улучшение и других параметров бурового раствора в испытательной ёмкости.

Таблица. Утяжеление бурового раствора

Table. Weighting drilling mud

Параметр бурового раствора Option of drilling mud	До начала испытаний Before testing	После испытаний в контрольной ёмкости After tests in the control tank	После испытаний в испытательной ёмкости After tests in a test tank
Время коррекции, ч Correction time, h	–	6,0	4,2
Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	1,19	1,73	1,72
Условная вязкость, с Conditional viscosity, s	50	61	34
Водоотдача, см ³ Water loss, cm ³	4,5	4,5	4,0
Корка, мм Cork, mm	1,0	1,0	1,0
СНС, 1/10, Па Pressure shift static (PSS), Pa	20/50	35/71	20/40
рН	10,5	9,5	9,0

Выводы

Таким образом, технология и оборудование ВСМА демонстрируют неоспоримые преимущества по сравнению с существующим оборудованием приготовления и коррекции бурового раствора. Это проявилось как в лабораторных исследованиях, так и при работе оборудования ВСМА в промышленных условиях бурения скважин. Основными показателями преимущества технологии и оборудования ВСМА в процессе приготовления и коррекции бурового раствора являются:

1. Высокая диспергация частиц дисперсной фазы. Радиус преобладающего количества частиц дисперсной фазы при использовании оборудования ВСМА находится в диапазоне от 2,0 до 7,0 мкм.
2. Сокращение времени приготовления бурового раствора. Время приготовления бурового раствора при использовании оборудования ВСМА сокращается в три раза по сравнению с механическими мешалками.
3. Энергоёмкость оборудования ВСМА в процессе приготовления бурового раствора высокого качества существенно ниже, чем при использовании традиционных механических мешалок.
4. Совместное использование оборудования ВСМА и штатных механических мешалок обеспечивает более высокое качество бурового раствора при его коррекции, сопровождаемой существенным сокращением затрат электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гайдаров М.М.-Р., Кравцов С.А. Дезинтеграторная технология приготовления буровых растворов и технологических жидкостей // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ВНИИОЭНГ, 2007. – № 10. – С. 29–33.
2. Real time prediction of suspended solids in drilling fluids. Review Article / S.C. Magalhães, C.M. Scheid, L.A. Calçada, L.M.M. Lutterbach, R.S. Rezende, A.T.A. Waldmann // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – March 2016. – V. 30. – P. 164–175.
3. Косоруков П.А. Повышение дисперсности ильницкого бейделита путем химического модифицирования // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. – 2008. – Т. 6. – № 2. – С. 433–441.
4. Маслов В.В., Коновалов Е.А., Плаксин Р.В. Исследование кавитационной технологии приготовления буровых технологических жидкостей // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2006. – № 6. – С. 38–40.
5. Surface chemistry and rheological properties of API bentonite drilling fluid: pH effect, yield stress, zeta potential and ageing behavior. Original Research Article / Weian Huang, Yee-wong Leong, Ting Chen, Pek-Ing Au, Xianhua Liu, Zhengsong Qiu // Journal of Petroleum Science and Engineering. – October 2016. – V. 146. – P. 561–569.
6. Червяков В.М., Юдаев В.Ф. Гидродинамические и кавитационные явления в роторных аппаратах. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 128 с.
7. The influence of water-based drilling fluid on mechanical property of shale and the wellbore stability. Original Research Article / Shu He, Lixi Liang, Yinjin Zeng, Yi Ding, Yongxue Lin, Xiangjun Liu // Petroleum. – March 2016. – V. 2. – Iss. 1. – P. 61–66.
8. Effect of drilling fluid hydraulics on drill stem vibrations. Original Research Article / Mohammed F. Al Dushaishi, Runar Nygaard, Daniel S. Stutts // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – September 2016. – V. 35. – P. A. – P. 1059–1069.
9. Fattah K.A., Lashin A. Investigation of mud density and weighting materials effect on drilling fluid filter cake properties and formation damage. Original Research Article // Journal of African Earth Sciences. – May 2016. – V. 17. – P. 345–357.
10. Physicochemical properties of potential low-temperature drilling fluids for deep ice core drilling. Original Research Article / Ning Liu, Huiwen Xu, Yang Yang, Lili Han, Lili Wang, Pavel Talalay // Cold Regions Science and Technology. – September 2016. – V. 129. – P. 45–50.
11. АВТОРЫ Real time prediction of drilling fluid rheological properties using Artificial Neural Networks visible mathematical model (white box). Original Research Article // Journal of Petroleum Science and Engineering. – October 2016. – V. 146. – P. 1202–1210.
12. Барзов А.А., Галиновский А.Л., Пузаков В.С. Ультратруйные технологии жидкостей и суспензий. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 250 с.
13. Khamehchi E., Tabibzadeh Sh., Alizadeh A. Rheological properties of Aphron based drilling fluids. Original Research Article // Petroleum Exploration and Development. – December 2016. – V. 43. – Iss. 6. – P. 1076–1081.
14. Константинов Г.Г., Розинкин И.С. Малая гидроэнергетика // Мат. Всерос. науч.-практ. конф. Т. 2. – Иркутск: ИРНТУ, 2016. – С. 360–365.
15. Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах / К. Холмберг, Б. Йенссон, Б. Кронберг, В. Линдман. – М.: Бином, 2007. – С. 178–185.
16. Механизм действия ПАВ как деэмульгаторов нефтяных эмульсий / С.И. Борисов, М.В. Катеев, Е.С. Калинин, О.С. Калинина, Н.П. Мелощенко, В.В. Сорокин // Нефтяное хозяйство. – 2004. – № 4. – С. 74–77.
17. Рязанов Я.А. Энциклопедия по буровым растворам. – Оренбург: Летопись, 2005. – 663 с.
18. Изменение реологических свойств высокопарафинистых нефтей под воздействием виброструйной магнитной активации / Ю.В. Лоскутова, И.В. Прозорова, Н.В. Юдина, В.А. Данекер, С.В. Рикконен // Инженерно-физический журнал. – 2004. – Т. 77. – № 5. – С. 146–150.
19. Способ вибрационной струйной магнитной декомпрессионной акустической активации растворов: пат. РФ № 2203862; заявл. 20.09.1999; опубл. 10.05.2003.
20. Расчёт гидравлических сопротивлений затопленного вибрирующего конфузора электромагнитного вибратора / А.В. Азин, Е.П. Богданов, С.В. Пономарёв, С.В. Рикконен // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 2. – С. 67–75.

Поступила 29.05.2017 г.

Информация об авторах

Данекер В.А., кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и электрооборудования Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Рикконен С.В., кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDC 544.77.032.1:62–837

PREPARATION AND CORRECTION OF DRILLING MUD BY TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF VIBRO-JET-MAGNETIC ACTIVATION

Valery A. Daneker¹,
vad@tpu.ru

Sergey V. Rikkonen²,
rikk2@yandex.ru

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

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

Relevance of the research is caused by the need to develop high-performance and resource-saving equipment, used to prepare and to correct drilling mud for well-drilling. One of techniques to solve the problem is using new technology of vibro-jet-magnetic activation of muds. The technology is realized by submersible electromagnetic vibrational device, operating in resonance mode. Resonance operation mode of such device ensures high energy impact on drilling mud structure in local activation area, which results in higher dispersion degree of dispersed particles. At the same time the resonance operation mode of the device is characterized by the lowest energy consumption level.

The aim of the research is to get and to compare the quality factors of drilling muds prepared on traditional mechanical centrifugal stirrers and on equipment of vibro-jet-magnetic activation.

Research methods. The studies were carried out in laboratory and in the field by means of pilot laboratory and industrial equipment. Dispersion of the prepared drilling muds was estimated by sedimentation method. Energy saving was evaluated by calculation according to operation time of the equipment with the set electric capacity.

The results. Quality of drilling mud prepared using equipment of vibro-jet-magnetic activation is considerably higher than the quality of drilling mud prepared using traditional equipment, which was confirmed by smaller sizes of dispersed particles. Preparation and correction time of drilling mud by means of equipment of vibro-jet-magnetic activation are 3–6 times smaller as compared to traditional mechanical centrifugal stirrers.

Key words:

Drilling mud, dispersion, vibro-jet-magnetic activation, resonance, resource efficiency, quality.

REFERENCES

- Gaydarov M.M.-R., Kravtsov S.A. Dezintegrirrovannaya tekhnologiya prigotovleniya burovnykh rastvorov i tekhnologicheskikh zhidkostey [Disintegrated technique for preparing drilling and process fluids]. *Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more* [Construction of oil and gas wells on land and sea]. Moscow, VNIIOENG Publ., 2007. No. 10, pp. 29–33.
- Magalhães S.C., Scheid C.M., Calçada L.A., Lutterbach L.M.M., Rezende R.S., Waldmann A.T.A. Real time prediction of suspended solids in drilling fluids. Review Article. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, March 2016, vol. 30, pp. 164–175.
- Kosorukov P.A. Povyshenie dispersnosti ilnitskogo beydellita putem khimicheskogo modifitsirovaniya [Increase of dispersive capacity of ilnitsk beydellite by chemical modification]. *Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies*, 2008, vol. 6, no. 2, pp. 433–441.
- Maslov V.V., Kononov E.A., Plaksin P.V. Issledovanie kavitatsionnoy tekhnologii prigotovleniya burovnykh tekhnologicheskikh zhidkostey [Studying the cavitation technique of preparing drilling fluids]. *Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2007, no. 6, pp. 38–40.
- Weian Huang, Yee-wong Leong, Ting Chen, Pek-Ing Au, Xianhua Liu, Zhengsong Qiu. Surface chemistry and rheological properties of API bentonite drilling fluid: pH effect, yield stress, zeta potential and ageing behavior. Original. Research Article. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, October 2016, vol. 146, pp. 561–569.
- Chervyakov V.M., Yudaev V.F. *Gidrodinamicheskie i kavitatsionnye yavleniya v rotornykh apparatakh* [Hydrodynamic and cavitation phenomena in rotor devices]. Moscow, Mashinostroeniye 1 Publ., 2007. 128 p.
- Shu He, Lixi Liang, Yinjin Zeng, Yi Ding, Yongxue Lin, Xiangjun Liu. The influence of water-based drilling fluid on mechanical property of shale and the wellbore stability. Original Research Article. *Petroleum*, March 2016, vol. 2, Iss. 1, pp. 61–66.
- Mohammed F. Al Dushaishi, Runar Nygaard, Daniel S. Stutts. Effect of drilling fluid hydraulics on drill stem vibrations. Original Research Article. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, September 2016, vol. 35, P. A, pp. 1059–1069.
- Fattah K.A., Lashin A. Investigation of mud density and weighting materials effect on drilling fluid filter cake properties and formation damage. Original Research Article. *Journal of African Earth Sciences*, May 2016, vol. 17, pp. 345–357.
- Ning Liu, Huiwen Xu, Yang Yang, Lili Han, Lili Wang, Pavel Talalay. Physicochemical properties of potential low-temperature drilling fluids for deep ice core drilling. Original Research Article. *Cold Regions Science and Technology*, September 2016, vol. 129, pp. 45–50.
- АВТОПЫ Real time prediction of drilling fluid rheological properties using Artificial Neural Networks visible mathematical model (white box). Original Research Article. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, October 2016, vol. 146, pp. 1202–1210.
- Barzov A.A., Galinovsky A.L., Puzakov V.S. *Ultrastruynnye tekhnologii zhidkostey i suspenziy* [Ultra-jet techniques of liquids and suspensions]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2009. 250 p.
- Khamehchi E., Tabibzadeh Sh., Alizadeh A. Rheological properties of Aphron based drilling fluids. Original Research Article. *Petroleum Exploration and Development*, December 2016, vol. 43, Iss. 6, pp. 1076–1081.

14. Konstantinov G.G., Rozinkin I.S. Malaya gidroenergetika [Small hydropower]. *Materialy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proc. of All-Russian scientific conference]. Irkutsk, IRNITU Publ., 2016. Vol. 2, pp. 360–365.
15. Kholmberg K., Yensson B., Kronberg B., Lindman V. *Poverkhnostno-aktivnye veshchestva i polimery v vodnykh rastvorakh* [Surface-active reagents and polymers in water solutions]. Moscow, Binom Publ., pp. 178–185.
16. Borisov S.I., Kateev M.V., Kalinin E.S., Kalinina O.S., Meloshenko N.P., Sorokin V.V. Mekhanizm deystviya PAV kak deemulgatorov neftyanykh emulsiiy [Mechanism of SAS as demulsifiers of oil emulsions]. *Neftyanoe khozyastvo*, 2004, no. 4, pp. 74–77.
17. Ryazanov Ya.A. *Entsiklopediya po burovym rastvoram* [Encyclopedia in drilling liquids]. Orenburg, Letopis Publ., 2005. 663 p.
18. Loskutova Yu.V., Prozorova I.V., Yudina N.V., Daneker V.A., Rikkonen S.V. Izmenenie reologicheskikh svoystv vysokoparafinistykh neftey pod vozdeystviem vibrostruynoy magnitnoy aktivatsii [Change in rheological properties of high-paraffinic oils under vibro-jet magnetic activation]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 2004, vol. 77, no. 5, pp. 146–150.
19. Guzeev S.P., Daneker V.A., Rikkonen S.V., Teplov A.I., Khorkov A.K. *Sposob vibratsionnoi struynoy magnitnoy dekompressionnoy akusticheskoy aktivatsii rastvorov* [Method of vibration jet magnetic decompression acoustic activation of solutions]. Patent RF no. 2203862, 2003.
20. Azin A.V., Bogdanov E.P., Ponomarev S.V., Rikkonen S.V. Calculation of hydraulic resistances of a submerged vibrating confuser of an electromagnetic vibrator. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 2, pp. 67–75. In Rus.

Received: 29 May 2017.

Information about the authors

Valery A. Daneker, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey V. Rikkonen, Cand. Sc., senior researcher, National Research Tomsk State University.

УДК 550.4:546.79(571.53)

УРАН И ТОРИЙ В ПОЧВЕННОМ ПОКРОВЕ ИРКУТСКО-АНГАРСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЗОНЫ (ПРИБАЙКАЛЬЕ)

Гребенщикова Валентина Ивановна¹,
vgreb@igc.irk.ru

Грицко Полина Павловна¹,
rysya-87@mail.ru

Кузнецов Петр Викторович²,
petr-kp@mail.ru

Дорошков Артемий Андреевич¹,
rendrom@gmail.com

¹ ФГБУН Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а

² ФГБУН Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН,
Россия, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная д. 84/32, с. 14

Актуальность работы обусловлена возрастающей потребностью исследования особенностей распределения радиоактивных элементов в почвенном покрове промышленных городов с интенсивной техногенной нагрузкой.

Цель работы: качественная и количественная оценка уровня загрязнения почвенного покрова городов и их окружения по данным изучения валовых содержаний радионуклидов (U, Th).

Методы исследования: неинвазивный рентгенофлуоресцентный анализ на рентгеновском спектрометре S4 Pioneer фирмы Bruker AXS (Германия), статистические и картографические методы.

Результаты. Проведен сравнительный химический анализ почв двух городов Байкальского региона – Иркутска и Ангарска – по содержанию в них радионуклидов – U и Th и значений мощности экспозиционной дозы. Анализ почвенных проб на территории Иркутска в условно выделенных нами ранее «аномальных» участках города подтвердил наличие относительно повышенных значений содержаний тория и урана в нескольких местах города: авиазавод (U); военный склад (Th); некоторые автозаправки в центральной части города (U); остров Юность (U). Интересно, что повышенные содержания урана и тория отмечаются не в одних и тех же местах города, а всегда в разных. В почвенном покрове г. Ангарска, включая его жилую, промышленную зоны и ближайшее окружение, содержания урана находятся в пределах 0,5–10,6 мг/кг, тория – 1,8–30,8 мг/кг и повышены только на локальных участках вблизи объектов теплоэнергетики. В пробах шлама из гидрозолоотвала также отмечено повышенное содержание урана – 10,1 и 17 мг/кг и тория – 29 и 44 мг/кг.

Выводы. Определение валовых содержаний Th и U в аккумулятивном горизонте почв территорий промышленных городов Прибайкалья – Иркутска и Ангарска – и их окружения показали широкую вариабельность значений их содержаний, которые зачастую превышают региональный фон Байкальского региона, но имеют близкие между собой средние содержания. Локальные аномалии на территории г. Иркутска характеризуются более высоким содержанием урана в почвах по сравнению с таковыми на территории г. Ангарска, что обусловлено тем, что промышленные зоны г. Ангарска находятся за пределами жилой застройки города. Повышенные содержания тория, урана, а также уровень мощности экспозиционной дозы фиксируются в почвенном покрове городов небольшими, локальными «пятнами» вокруг промышленных объектов или на некотором удалении от них, что свидетельствует об их преимущественно аэротехногенном поступлении. Установлено, что буферная емкость экосистем рассматриваемых городов относительно радионуклидов не достигла критического уровня и соответствует региональным фоновым параметрам.

Ключевые слова:

Почвенный покров, уран, торий, промышленные и жилые зоны, МЭД, источники радионуклидов.

Введение

Почвенный покров является депонирующим компонентом и фактически аккумулирует в себе все загрязнители, поступающие в окружающую среду, поэтому является существенным информативным источником геохимического состояния окружающей среды, в том числе на территории крупных городов. Причины миграции и накопления радионуклидов в почвах могут быть обусловлены различными факторами: типом и составом почв, физико-химическим состоянием элемента, формами его нахождения, сорбционными и миграционными особенностями, pH жидкой фазы почвы

и др. [1, 2]. Одновременно отмечается способность почвенного покрова к самоочищению при определенных физико-химических параметрах (pH, биохимическая активность, сорбционная способность, тип почв и др.) [3], несмотря на техногенное воздействие.

Городские почвы (почвы, почвогрунты, урбанизированные, техноземы и т. д.) – это почвы, сформированные в результате хозяйственной деятельности человека. На городских территориях, по сравнению с природными, антропогенный фактор в почвообразовании считается ведущим, поэтому для них часто характерно отсутствие четко выражен-

ных почвенных горизонтов, и они представляют собой сложную природно-антропогенную систему. Участки с относительно ненарушенными почвами приурочены к парковым и лесопарковым территориям городов.

Южная часть Прибайкалья, где территориально находятся рассматриваемые города Иркутск и Ангарск, в геологическом отношении представляет собой юрский угленосный бассейн с известными месторождениями угля (Иркутский угольный бассейн), используемыми в энергетике Байкальского региона.

Почвенный покров содержит широкую гамму радиоактивных химических элементов естественного и техногенного происхождения, так как является самой благоприятной средой поглощения радионуклидов. Почва выступает как природный сорбент, длительно сохраняющий в себе последствия экологических катаклизмов. Опыт изучения радионуклидов в Горном Алтае показал [4], что их повышенные содержания в компонентах окружающей среды могут иметь разные источники: последствия мирных ядерных испытаний, аномалии природных месторождений, влияние промышленных предприятий и др.

Почвы Прибайкалья изучались в разное время на содержание радиоактивных элементов (U, Th, Rn, ^{137}Cs , ^{90}Sr) в связи с глобальным переносом и выпадением радиоактивных осадков после ядерных испытаний на Семипалатинском и Новоземельском полигонах. Исследования в этом направлении проводились с конца 70-х годов прошлого столетия и по настоящее время [5–7]. Однако сведений о валовых содержаниях тория и урана в компонентах окружающей среды конкретно на городских территориях Байкальского региона явно недостаточно, или они отсутствуют.

Основная цель работы – определить содержания, выявить источники привноса радионуклидов (урана и тория) в почвенный покров и показать особенности их распределения на территориях наиболее крупных городов Прибайкалья – Иркутска и Ангарска. Определив возможный генезис участков повышенных содержаний этих поллютантов (природный или техногенный) можно использовать полученные данные для дальнейшего прогнозирования экологически неблагоприятных участков на территории городов, их правильного и рационального использования.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования служили почвенные покровы городов Иркутска и Ангарска и их пригородов (рис. 1).

Город Иркутск является областным центром Иркутской области и расположен на берегах реки Ангары.

Город Ангарск – промышленный город, расположен в 70 км на С-З от областного центра города Иркутска, в междуречье Ангары и Китоя. В настоящее время г. Иркутск и г. Ангарск включены в

приоритетный список городов России с относительно повышенным уровнем атмосферного загрязнения [8]. Основными загрязнителями окружающей среды в рассматриваемых городах служат предприятия химической, нефтехимической и атомной промышленности, а также теплоэнергетики, металлургии, авиастроения, автотранспорта и др.

В геологическом строении городов принимают участие породы юрского угленосного бассейна, сложенные песчаниками, алевролитами и аргиллитами, переслаивающимися с горизонтами углей разной мощности, карбонатных осадков и глин.

В рассматриваемых городах отмечаются низкие среднегодовые температуры воздуха, воды и почвы, длительный период промерзания компонентов окружающей среды (5 месяцев), что может обуславливать пониженную возможность их к самоочищению от антропогенного воздействия.

Почвенный покров территорий Ангарска и Иркутска и их окрестностей достаточно разнообразен. На целинных участках в городах и их окрестности преимущественно распространены серые лесные почвы и дерновые лесные, на окраинах в долинах рек встречаются лугово-болотные. В городах и за пределами городов территории заняты хвойными (сосна) и смешанными лесами; в долинах рек встречаются участки, свободные от леса под луговым разнотравьем.

Объектами исследования являлись городские почвы, расположенные в различных функциональных зонах (промышленных, селитебных, природно-рекреационных) и почвы в ближайшем окружении городов.

Опробование почвенного покрова городов Иркутска и Ангарска проводилось в 2010–2013 гг. по сети 1:100 000 (1×1 км) со сгущением (500×500 м) при необходимости на наиболее интересных или проблемных участках. Пробы почв отбирались методом конверта из поверхностного гумусово-аккумулятивного слоя (0–10 см), предварительно очищенного от верхнего дернового слоя. В общей сложности в г. Иркутске и его окружении было отобрано и проанализировано 223 почвенные пробы (почвы, почвогрунты, урбаноземы и др.). В г. Ангарске и его окружении – 130 проб. В южной части Ангарска в гидрозолоотвале-шламохранилище ТЭЦ отобрано 2 пробы шлама, в обводном и дренажном каналах вокруг него отобрано 5 проб донных отложений.

Одновременно с опробованием почв и донных осадков проводилось сопряженное измерение мощности экспозиционной дозы гамма-излучения (МЭД). Измерение МЭД выполнялось на высоте 1 м от поверхности почвы дозиметром ДКГ-07Д «ДРОЗД».

Для определения валового содержания U и Th в почвах использовался неструктивный рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) на рентгеновском спектрометре S4 Pioneer фирмы Bruker AXS (Германия) в аналитической лаборатории ИГХ СО РАН



Рис. 1. Распределение содержаний урана и тория в почвенном покрове города Иркутска и его пригорода. Примечание: 1 – жилой сектор; 2 – авиазавод; 3 – дороги; 4 – места отбора проб почв

Fig. 1. Distribution of uranium and thorium contents in soil cover in Irkutsk and its surroundings. Note: 1 is the residential sector; 2 is the aircraft factory; 3 are the roads; 4 are the sampling sites of soils

(аналитик Т.С. Айсуева). Предел обнаружения элементов составляет 1 мг/кг. Правильность методики определения U и Th в почвах оценивали с помощью стандартных образцов.

Работа выполнена с использованием научного оборудования ЦКП «изотопно-геохимических исследований ИГХ СО РАН».

Результаты исследований и их обсуждение

Геохимические особенности сопряженных компонентов окружающей среды Прибайкалья (порода, почва, вода, снег) рассматривались ранее [9–14] по различным элементам-токсикантам. В данной статье проведен сравнительный химический анализ почв двух конкретных городов – Иркутска и Ангарска – по валовому содержанию в них радионуклидов – U и Th – и значений мощности экспозиционной дозы (МЭД).

Иркутск

По полученным нами ранее данным [7] и подтвержденным позднее в почвах города Иркутска разброс содержаний как урана (от <1 до 44,9 мг/кг), так и тория (от 5 до 27,4 мг/кг) довольно значителен, что свидетельствует о неоднородном характере распределения радионуклидов в почвенном покрове города.

Анализ полученных эмпирических данных проводился в сравнении с региональными фоновыми содержаниями исследуемых радионуклидов в верхнем горизонте почв по Байкальскому региону, которые для U составляет 2,01 мг/кг, для Th – 6,26 мг/кг [9–11]. По литературным данным, среднее содержание в гумусовых горизонтах почв [15] для U составляет 1 мг/кг, для Th – 6 мг/кг; для почв мира [16] – 1 и 5 мг/кг соответственно (таблица).

Почвы в пригороде Иркутска незначительно отличаются от городских по содержаниям радионуклидов. В почвах городской территории среднее содержание Th – 9,4 мг/кг, U – 3,5 мг/кг (повышено за счет нескольких «аномальных» точек), при этом медианное значение составляет для Th – 9,1 мг/кг, для U – 2,1 мг/кг. В почвах пригорода содержания Th 5–19,2 мг/кг, среднее – 9 мг/кг; U 1,2–3,6 мг/кг, среднее – 2 мг/кг.

В почвенном покрове Иркутска локальные «аномалии» содержаний радионуклидов приурочены главным образом к территориям промышленных предприятий, что связано со спецификой их деятельности. Максимальные концентрации урана отмечались в виде четырех небольших по площади участков: 1) возле ТЭЦ, работающей на угле, – 15,8 мг/кг; 2) вблизи взлетной полосы Иркутского авиазавода – 23,3 мг/кг; 3) на острове Юность возле детской железной дороги – 44,9 мг/кг; 4) в промышленном центральном районе города – 15,4 мг/кг [7].

Максимальные содержания тория были сконцентрированы вблизи военной базы – 27,44 мг/кг, а также на одном из дачных участков – 11,04 мг/кг.

Диапазон наиболее часто встречаемых концентраций тория в почвах Иркутска варьирует от 6 до 12 мг/кг, урана – от 1 до 5 мг/кг.

Повторное опробование и анализ почвенных проб на территории Иркутска в условно выделенных «аномальных» участках города подтвердил наличие относительно повышенных значений содержаний тория и урана в нескольких местах: авиазавод (U); военный склад (Th); некоторые автозаправки в центральной части города (U); остров Юность (U). Интересно, что повышенные содержания урана и тория отмечаются не в одних и тех же местах города, а всегда в разных: например, в районе авиазавода повышен только уран, а в районе военного склада – торий, что, вероятно, связано со спецификой источников радионуклидов.

Стоит отметить повышенные содержания урана и тория в почвогрунтах вблизи некоторых автозаправок в центральной части города (рис. 1), где всегда отмечается нарушение почвенного покрова и наличие привозного грунта. Ранее эта закономерность отмечалась нами по содержаниям радионуклидов в снеговой воде города в районе автозаправок [12].

Построенные площадные моноэлементные карты-схемы распределения радионуклидов в почвенном покрове Иркутска отчетливо отражают перечисленные участки относительно повышенных содержаний тория и урана.

Известно, что уран обладает достаточно высокой миграционной способностью, и загрязнение им почвенного покрова может создавать предпосылку для его дальнейшей миграции на более глубокие горизонты и в сопредельные среды и загрязнение их. Уран в почвах находится в форме UO_2^{2+} , который образует с органическим веществом почвы хорошо растворимые комплексы. Как было установлено [17], присутствие нитратов влияет на повышение подвижности урана в грунтовых водах.

Th в почвах менее подвижен, чем U, и он почти полностью сорбируется при взаимодействии почв с растворами. Th образует нерастворимые комплексные соединения с органическими компонентами почвы. Закрепление антропогенного урана на геохимических барьерах в почве может быть обусловлено металл-редуцирующими бактериями и железом низкой окисленности [2].

Исследования показали, что максимальное количество радионуклидов аккумулируется в гумусовом горизонте почвенного покрова на глубине 0–5 см в городах и их ближайшем окружении, включая верхний дерновый слой. Стоит отметить, что концентрации урана и тория практически во всех рассмотренных почвенных разрезах Иркутска [7], а также по имеющимся литературным данным [18], закономерно убывают с глубиной, что указывает на аэротехногенную природу повышенных содержаний исследуемых поллютантов на территории города Иркутска.

Величина торий-уранового отношения (Th/U) – важный оценочный показатель состояния почв.

В почвах, не подверженных интенсивному техногенному воздействию, этот показатель для большинства генетических типов почв различных природно-климатических зон Сибири находится на уровне 3–5 [19, 20].

Результаты проведенного исследования показали, что соотношение Th/U в почвенном покрове города Иркутска находится на уровне регионального значения – 3,5–5. В основном это урбанизированные территории, зоны массовой жилой застройки. В то же время в зонах влияния промышленных предприятий города установлены локальные участки, почвы которых характеризуются Th/U отношением менее 3, например, в районе авиазавода. Пониженные значения торий-уранового отношения характерны для почвенного покрова городских территорий, который чаще всего представляет собой техногенно-измененный почвогрунт, состоящий из смеси почв и каких-либо строительных материалов (шлак, зола, глина, торф и др.). Наиболее повышенные значения Th/U отношения (8–11,7) выявлены на окраинах города Иркутска в местах новых строящихся микрорайонов, где почвенный покров существенно нарушен. Соответственно содержание урана в западной и южной частях города меньше 3 мг/кг (рис. 1).

Повышенные содержания естественных радиоактивных элементов в почвах можно охарактеризовать таким показателем, как мощность эквивалентной дозы излучения (МЭД). Средний гаммафон для Иркутской области, по данным наблюдений Иркутского межрегионального территориального управления федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, составляет 0,11–0,20 мкЗв/ч [8]. По полученным нами данным, повышенные значения МЭД гамма-излучения в Иркутске главным образом проявились в местах повышения содержания радионуклидов: 0,26 мкЗв/ч – напротив взлетной полосы Иркутского авиазавода и на острове Юность возле детской железной дороги, где использовался привозной (гранитогнейсовый) щебень. В среднем по Иркутску, по нашим данным, МЭД составляет 0,15–0,20 мкЗв/ч. Допустимые нормативы – 0,27–0,57 мкЗв/ч (СП 2.6.1.2612–10 и СанПиН 2.6.1.2800–10).

В целом, по результатам исследования в Иркутске, можно сделать вывод, что радиационная обстановка на территории г. Иркутска и его окрестностей остается благополучной. Проявляется условно «урановая» и «ториевая» специализация некоторых почвогрунтов в городе, обусловленная различными источниками загрязнения; установлены лишь локальные очаги превышения значений радионуклидов и, соответственно, уровня МЭД гамма-излучения, сопряженные с техногенными преобразованиями почвенного покрова.

Ангарск

Город Ангарск, по сравнению с Иркутском, относительно более молодой город, в градостроитель-

ном плане которого изначально было предусмотрено разделение на промышленную и жилую зоны. Между ними была сохранена широкая природная лесозащитная полоса (сосновый лес).

Количество в городе Ангарске промышленных предприятий, в том числе и с вредным производством, существенно больше, чем в Иркутске. Здесь находятся электролизный химический комбинат по обогащению урана, многочисленные заводы: нефтеперерабатывающий, газовый, гипсовый, керамический, трубный, металлоконструкций и другие, а также несколько ТЭЦ, которые вносят свой вклад в загрязнение города.

Самым крупным промышленным предприятием и одним из крупнейших в Сибири является нефтехимическая компания по переработке нефти и выпуску нефтепродуктов, которая оказывает влияние на атмосферное состояние в городе. Вторым по величине и вкладу в экономику города предприятием является электролизный химический комбинат (АЭХК) – одно из ведущих производств атомной промышленности России. Теплоэнергетика представлена крупными ТЭЦ (ТЭЦ-1, 9, 10), которые строились одновременно с комбинатами для их тепло- и энергообеспечения.

По ранее полученным нами данным по распределению элементов-токсикантов в почвах, следует отметить, что почвенный покров городов Иркутска и Ангарска, несмотря на современный техногенный пресс, относится к категории «допустимого» по уровню загрязнения тяжелыми металлами. Причины относительно благополучного состояния почв городов по содержанию тяжелых металлов связаны с наличием большого количества на территории городов зеленых насаждений, широких лесозащитных полос, являющихся естественными фильтрами и имеющимся потенциалом к восстановлению природных свойств почв городов Иркутской области.

В почвенном покрове г. Ангарска, включая его промышленную зону и ближайшее окружение, содержания урана находятся в пределах 0,5–10,6 мг/кг, тория – 1,8–30,8 мг/кг. Региональный фон Прибайкалья, как уже было сказано, для U – 2,01 мг/кг, для Th – 6,26 мг/кг, и превышение значений фона отмечается лишь на некоторых условно «аномальных» участках г. Ангарска (таблица).

Моноэлементные карты-схемы распределения радионуклидов в почвенном покрове на территории Ангарска выявили слабо выраженные ореолы в связи с небольшим разбросом содержаний элементов и соответственно слабой контрастностью (рис. 2). В большинстве случаев почвы на территории города содержат урана от 1,5 до 3,0 мг/кг, то есть на уровне регионального фона или незначительно превышают его. Почвы с повышенным содержанием урана (3–6 мг/кг) в виде нескольких пятен занимают незначительные участки жилой зоны города и приурочены к автотрассе Иркутск-Красноярск к западу от промышленной зоны,

Таблица. Содержания урана, тория, Th/U в почвах, донных отложениях, угле, золе и МЭД в городах Иркутске и Ангарске (Прибайкалье) [9–11, 15, 16, 21, 22]

Table. Contents of uranium, thorium, Th/U in soils, bottom sediments, coal, ash and ED (exposure dose) in Irkutsk and Angarsk (Baikal region) [9–11, 15, 16, 21, 22]

Территория, объект Territory, object	U, мг/кг mg/kg	Th, мг/кг mg/kg	Th/U	МЭД, мкЗв/ч μsv/h	Кол-во проб Number of samples
	min-max	min-max			
	m	m			
Почвы/Soils					
Иркутск (городская территория) Irkutsk (city area)	0,5–45 3,5	5–27,4 9,4	0,24–11,7 4,3	0,15–0,24	223
Пригород Иркутска Suburbs of Irkutsk	1,2–3,6 2,0	5–19,2 8,3	6–11 5,0	0,11–0,16	32
Ангарск (жилая территория) Angarsk (Residential area)	1,5–7 1,9	6–14,2 8,5	2–8,5 4,9	0,11–0,14	61
Ангарск (южная и восточная промышленные территории) Angarsk (Southern and Eastern industrial areas)	7–10,6 3,0	10–30,8 9,8	1,8–3,5 3,6	0,23–0,34	44
Пригород Ангарска/Suburbs of Angarsk	1,0–1,4	5,8–8	2,6–3,1	0,11–0,18	15
Кларк для почв [15]/Clark for soils [15]	1	6	6	–	–
Почвы мира [16]/Soils of the world [16]	1	5	5	–	–
Региональный фон в почвах Байкальского региона [9–11] Regional background in the soils of the Baikal region [9–11]	2,01	6,26	3,1	0,11–0,20	696
Донные отложения/Bottom sediments					
Шламоотстойник, Ангарск/Slime-ump, Angarsk	10,1–17	29–44	2,6–2,9	–	2
Обводной канал вокруг шламоотстойника, Ангарск Channel around the slime-ump, Angarsk	13,4	26,2	2,0	–	3
Дренажная канава (возле шламоотстойника) Drainage ditch (near the slime-ump)	10,6	29	2,7	–	1
Дренажная канава (возле р. Ангары)/Drainage ditch (near the Angara River)	2	8,2	4,1	–	1
Региональный фон в донных отложениях Байкальского региона [9–11] Regional background in bottom sediments of the Baikal region [9–11]	1,3	6,84	5,3	–	449
Уголь, зола углей/Coal, ash coal					
Уголь (Иркутский угольный бассейн) [22]/Coal (Irkutsk coal basin) [22–25]	2,7	4,1	1,5	–	129
Уголь (Иркутский угольный бассейн, авторские данные) Coal (Irkutsk coal basin, the data of the authors)	1–10	5–30	–	–	8
Зола угля (Иркутский угольный бассейн, авторские данные) Coal ash (Irkutsk coal basin, the data of the authors)	9–22	18–65	2,0–2,9	0,18	8
Кларк для углей [21]/Clark for coal [21]	2,4	3,3	1,4	–	8400
Кларк для золы [21]/Clark ash [21]	16	21	1,4	–	8400

включая предприятия ТЭЦ-1 и ТЭЦ-9, а также за пределами города в южной части, в районе шламоотстойника гидрозолоотвала ТЭЦ-9.

Максимальное содержание урана отмечается в почвах в южной части города вокруг гидрозолоотвала ТЭЦ-9, а также в его донных отложениях: в отложениях обводного канала вокруг отстойника и дренажной канавы, спускающейся в р. Ангары (рис. 2, таблица). Это связано с частичным привнесением шлама в воду каналов из гидрозолоотвала. Прослойки золы отмечаются также в профилях окружающих почв и содержат повышенное количество U и Th. Так, в двух пробах шлама, взятых с различной глубины из шламоотстойника, содержание урана составило 10,1 и 17 мг/кг, а тория – 29 и 44 мг/кг, что соответствует отношению Th/U соответственно 2,6 и 2,9.

Основной вклад в повышение содержаний урана в почвах вносит его выщелачивание из шламоотстойника и дальнейшая миграция в раствори-

мой форме и в виде взвесей по обводному и дренажному каналам в сторону р. Ангары. Большая часть техногенных взвесей осаждаются еще до разгрузки в р. Ангару (таблица). Миграция урана в растворенной форме способствует также загрязнению и других водных объектов, прямо не связанных с золоотвалом ТЭЦ, о чем свидетельствуют его повышенные содержания в воде прилегающего озера.

Повышенное содержание урана в почвенном покрове на локальных участках в черте города (вдоль трассы Иркутск–Красноярск) обусловлено, по всей вероятности, атмосферным переносом выбросов угольных ТЭЦ. В частности, исследования, проведенные нами на территории г. Черемхово Иркутской области, показали, что основным источником урана в почвах является сжигание местного каменного угля. В работе [14] отмечено, что содержание U в золе таких углей составляет 9–22 мг/кг, а Th – 18–65 мг/кг, а кларк радиоактивных элементов в золе углей [21] для U составля-

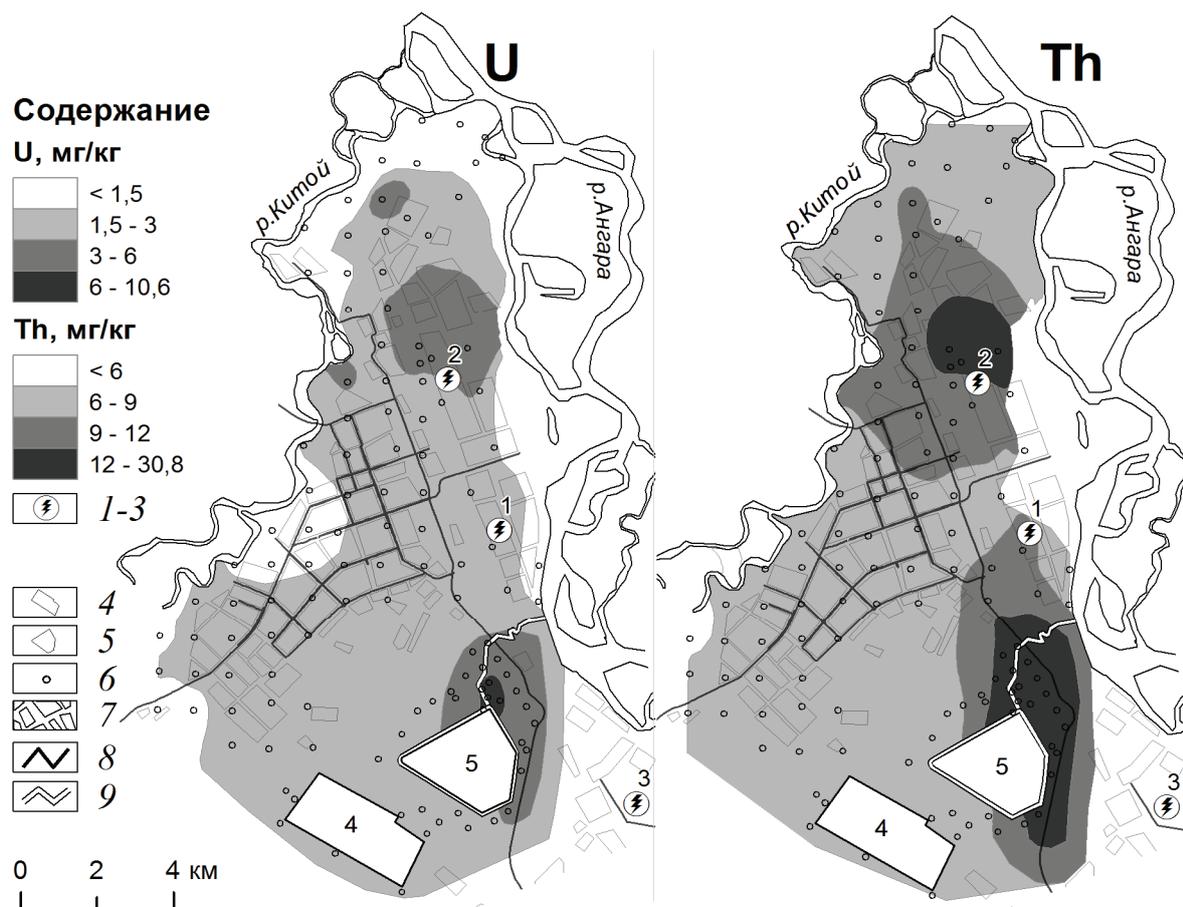


Рис. 2. Распределение содержаний урана и тория в почвенном покрове г. Ангарска и его пригороде. Примечание: 1–3 – теплоэлектростанции; 4 – электролизный химический комбинат; 5 – шламоотстойник; 6 – места отбора проб почв; 7 – жилой сектор; 8 – дороги; 9 – обводной и дренажные каналы

Fig. 2. Distribution of uranium and thorium contents in soil cover of Angarsk and its surroundings. Note: 1–3 are the thermal power stations; 4 is the electrolysis chemical plant; 5 is the slime-ump; 6 are the sampling sites of soils; 7 is the residential sector; 8 are the roads; 9 are the bypass and drainage channels

ет 15 ± 1 мг/кг, а для Th – 23 ± 1 мг/кг. Сами угли Иркутского угольного бассейна (таблица) характеризуются содержанием радионуклидов на уровне кларка [19, 22–25], а их зольность в среднем составляет 15,8 и 21,2 %, что ниже допустимого предела (45–50 %).

В западной и восточной окраинах Ангарска, приуроченных соответственно к поймам рек Куйтой и Ангара, в почвенном покрове отмечаются низкие содержания урана – менее 1,5 мг/кг. Даже в восточной промышленной части города, несмотря на имеющиеся здесь предприятия, содержания урана в почве не превышают 2 мг/кг.

Несколько иная картина распределения урана и тория отмечается по снеговому покрову. Снег является индикатором состава атмосферных выбросов. Исследования снегового покрова, выполненные на территории г. Ангарска, показали, что повышение содержания урана в снеговой воде отмечается только в восточной части города вблизи нахождения предприятий нефтехимической компании (рис. 3), при этом почвенный покров в этом районе в отношении урана остается фоновым (рис. 2,

нефтегазоперерабатывающее предприятие находится вблизи района ТЭЦ). Обогащение снеговой воды и почвы U и Th вокруг нефтегазоперерабатывающих предприятий, нефтяных и угольных тепловых станций отмечалось и ранее, как российскими [26, 27], так и многими зарубежными исследователями [28–32], что свидетельствует о аэротехногенном поступлении радионуклидов при использовании и переработке нефти и газа и увеличении подвижности радионуклидов в таких районах. Отмечается также и повышенное содержание радиоактивных элементов в твердом осадке снега на территории г. Черемхово (Прибайкалье), где находится месторождение угля [13], что, естественно, подразумевает их поступление в почвенный покров. Полученные данные свидетельствуют о том, что угольные ТЭЦ влияют в первую очередь на почвенный покров, а нефтегазоперерабатывающие предприятия – на состав аэрозольных выпадений.

Распределение тория в почвах на территории г. Ангарска фактически повторяет характер распределения урана, но повышенные его содержания занимают более протяженные участки города

(рис. 2). На окраинах города содержание тория меньше 6 мг/кг (меньше регионального фона). Ореолы с повышенным содержанием отмечаются вдоль автотрассы (Иркутск–Красноярск) к западу от промышленных предприятий, а максимальные концентрации (до 30,8 мг/кг) приурочены к почвам южной части города за пределами жилой зоны в районе гидрозоолоотвала ТЭЦ-9.

Отношение Th/U в почвенном покрове Ангарска преимущественно находится на уровне 3–5. Пониженное Th/U отношение (≤ 3) в почвах характерно для южной части города – район АЭХК и гидрозоолоотвала ТЭЦ-9, а повышенное (> 7) – в северной (разрабатываемые карьеры) и в некоторых краевых частях города.

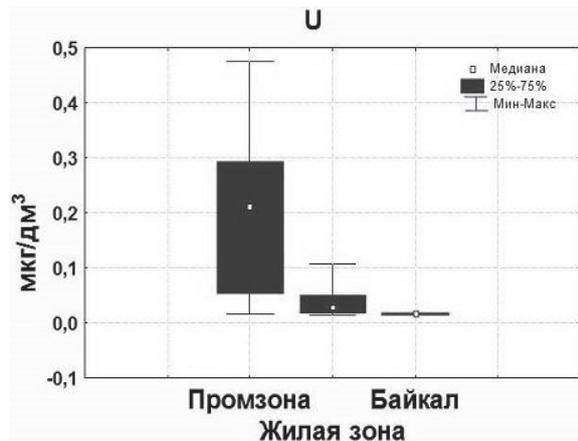


Рис. 3. Содержание урана в снеговой воде в восточной промышленной и жилой зонах г. Ангарска и западного побережья озера Байкал (природный район)

Fig. 3. Content of uranium in snow water in the eastern industrial and residential areas of Angarsk and the western coast of Lake Baikal (natural area)

В промышленной зоне и между промышленной и жилой зонами города Ангарска (автотрасса) величина МЭД возрастает – 0,23–0,34 мкЗв/ч, при этом максимальное значение МЭД отмечается вблизи территорий ТЭЦ-1 и ТЭЦ-9. В жилой части города и его окрестностях величина МЭД низкая и составляет 0,14–0,18 мкЗв/ч. Напомним, что в качестве допустимого естественного радиационного фона уровень МЭД внешнего гамма-излучения принято 0,33 мкЗв/ч (0,27–0,57).

Если в Иркутске корреляция между содержаниями U и Th в почвенном покрове нами не установлена [7], то в Ангарске она отчетливо намечается, но преимущественно только для нарушенных почв промышленных зон (рис. 4), что, вероятно, связано с дополнительным техногенным поступлением одновременно урана и тория в восточной части города. Минимальные содержания обоих элементов и низкое Th/U отношение отмечены в почвах между АЭХК и шламоотстойником, которые наиболее подвержены дренажу поверхностными и грунтовыми водами (рис. 2, 4).

Результаты исследований почв г. Ангарска позволяют считать, что радиоактивная обстановка в жилой зоне города является благоприятной для проживания и по концентрациям радионуклидов в почвах соответствует уровню регионального фона. Установлены лишь локальные участки почвенного покрова с превышением содержания радионуклидов по сравнению с региональным фоном и, соответственно, повышением уровня МЭД гамма-излучения, обусловленные техногенными преобразованиями почвенного покрова.

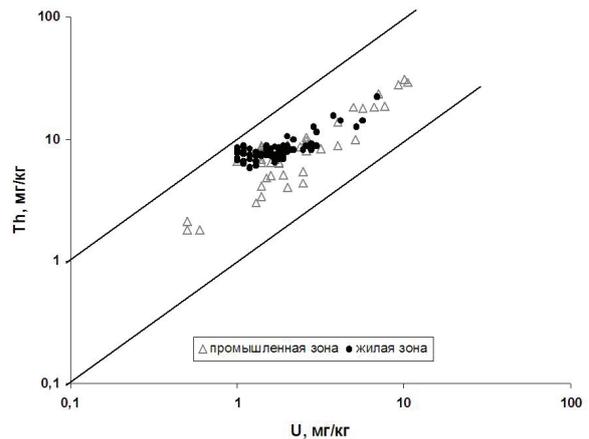


Рис. 4. Зависимость содержания урана и тория в почвенном покрове г. Ангарска

Fig. 4. Dependence of uranium and thorium contents in soil cover of Angarsk

Повышенные содержания радиоактивных элементов в почвах крупных промышленных городов Прибайкалья – Иркутска и Ангарска – имеют различное происхождение, связанное со спецификой деятельности промышленных предприятий и градостроительными особенностями. Предусматривается дальнейшее изучение изотопного состава радионуклидов в почвах промышленных городов с целью достоверного определения источников их поступления.

Несмотря на локальный характер и малые площади загрязнения почв рассмотренными радионуклидами, в городах Прибайкалья проводится регулярный контроль радиационной обстановки.

Эколого-геохимической оценке почвенного покрова городских территорий и картированию загрязненных участков в последнее время уделяется серьезное внимание во многих странах мира в связи с безопасностью жизнедеятельности населения и рациональным использованием городских территорий [26–32]. В последние годы появилось и такое понятие, как кларк элементов городских почв [33], однако для урана и тория кларки в городских почвах не определены. Существуют лишь различные оценочные уровни загрязнения почв селитебных территорий с учетом различных показателей: мировых кларков, предельно допустимых концентраций, относительно допустимых уровней, предельно допустимых уровней, региональных фоновых содержаний и др.

Выводы

Полученные результаты определения валовых содержаний Th и U в аккумулятивном горизонте почв территорий промышленных городов Прибайкалья – Иркутска и Ангарска – и их пригородов показали широкую вариабельность значений их содержаний, которые иногда превышают региональный фон Байкальского региона, но имеют близкие между собой средние содержания.

Локальные аномалии на территории г. Иркутска характеризуются более высоким содержанием урана по сравнению с таковыми на территории г. Ангарска, что обусловлено тем, что промышленные зоны г. Ангарска находятся за пределами жилой застройки города. Влияние электролизного химического комбината по обогащению урана в г. Ангарске на содержание радионуклидов в почвенном покрове города достоверно не установлено.

Повышенные содержания тория, урана, а также уровень МЭД фиксируются в почвенном покрове рассмотренных городов небольшими локальными «пятнами» вокруг промышленных объектов или на некотором удалении от них, что свидетель-

ствует об их аэротехногенном поступлении. Величина МЭД не достигает предельно допустимого значения.

Жилые территории рассмотренных городов испытывают слабое влияние промышленных зон за счет обилия зеленых насаждений, ограничивающих жилые и промышленные участки.

Установлено, что приоритетными источниками повышенных содержаний тория и урана являются преобразование почвенного покрова, а также аэротехногенное поступление их от промышленных предприятий, преимущественно ТЭЦ и котельных, использующих уголь местного угольного бассейна.

Th/U отношение в местах жилой застройки территорий городов Иркутска и Ангарска в основном изменяется от 3 до 5. Снижение или повышение этого отношения характерно для почв промышленных участков городов и их окраин (местной жилой застройки).

Благодарности

Авторы благодарны сотрудникам ИГХ СО РАН, принимавшим участие в исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шапошникова Л.М., Шуктомова И.И. Особенности распределения урана, тория и радия в профиле техноподзолистой почвы // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 6. – С. 48–52.
2. Vodyanitskii Y.N. Chemical aspects of uranium behavior in soils: a review // Eurasian Soils Science. – 2011. – V. 44. – № 8. – P. – С. 862–873.
3. Напрасникова Е.В. Биохимические особенности почв индустриального города в условиях Восточной Сибири // Химия в интересах устойчивого развития. – 2014. – Т. 22. – № 5. – С. 483–488.
4. Гусева О.И., Гусев А.И. Радионуклиды в некоторых экосистемах Горного Алтая // Бюллетень «Природные ресурсы Горного Алтая». Геоэкология, гидрология и водные ресурсы. – 2011 (1). – № 14. – С. 142–153.
5. Геохимия окружающей среды Прибайкалья / П.В. Коваль, В.И. Гребенщикова, Н.А. Китаев и др. // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41. – № 4. – С. 571–577.
6. Chernyago V.P., Nepomnyashchikh A.I., Medvedev V.I. Current radiation environment in the Central Ecological Zone of the Baikal Natural Territory // Russian Geology and Geophysics. – 2012. – V. 53. – № 9. – P. 926–935.
7. Грицко П.П., Гребенщикова В.И. Содержание урана и тория в почвенном покрове территорий г. Иркутска и его пригорода // Инженерная экология. – 2014. – № 1. – С. 26–38.
8. Государственный доклад «О состоянии окружающей среды Иркутской области в 2014 году». – Иркутск: Форвард, 2015. – 328 с.
9. Геохимия окружающей среды Прибайкалья (Байкальский геоэкологический полигон) / В.И. Гребенщикова, Э.Е. Лустенберг, Н.А. Китаев, И.С. Ломоносов / науч. ред. акад. М.И. Кузьмин. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2008. – 234 с.
10. Radioactive elements distribution in the Environment of Pribaikale. Communication 1. Uranium / V.I. Grebenshchikova, N.A. Kitaev, E.E. Lustenberg, I.S. Lomonosov, V.I. Medvedev, A.N. Karchevskii // Contemporary Problems of Ecology. – 2009. – V. 2. – № 1. – P. 12–21.
11. Radioactive elements distribution in the Environment of Pribaikale. Communication 2. Thorium and cesium-137 / V.I. Grebenshchikova, N.A. Kitaev, E.E. Lustenberg, I.S. Lomonosov, V.I. Medvedev, A.N. Karchevskii // Contemporary Problems of Ecology. – 2010. – V. 3. – № 3. – P. 346–355.
12. Гребенщикова В.И. Геохимическая специфика состава снеговой воды некоторых городов Иркутской области // Вода: химия и экология. – 2013. – № 2. – С. 19–25.
13. Кузнецов П.В., Гребенщикова В.И., Айсуева Т.С. Оценка содержания урана и тория в почвах г. Черемхово (Иркутская область) и его окрестностей в связи с добычей и сжиганием каменного угля // Биосфера. – 2013. – V. 5. – № 2. – С. 175–181.
14. Халбаев В.Л., Гребенщикова В.И. Эколого-геохимическая характеристика почв г. Иркутска и его окрестностей // Инженерная экология. – 2013. – № 1. – С. 33–45.
15. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 237 с.
16. Bowen H.J.M. Environmental chemistry of the elements. – London: Academic Press, 1979. – 333 p.
17. Богуславский А.Е., Гаськова О.Л., Шемелина О.В. Миграция урана в грунтовых водах района шламохранилищ Ангарского электролизного химического комбината // Химия в интересах устойчивого развития. – 2012. – № 20. – С. 515–529.
18. Ahmed H., Young S.D., Shaw G. Factors affecting uranium and thorium fractionation and profile distribution in contrasting arable and woodland soils // Journal of Geochemical Exploration. – 2014. – V. 145. – P. 98–105.
19. Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в почвах Сибири // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы IV Международной конференции. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 448–451.
20. Язиков Е.Г., Таловская А.В., Журняк Л.В. Оценка эколого-геохимического состояния территории г. Томска по данным изучения пылеаэрозолей и почв. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 264 с.
21. Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of Cakes for carbonaceous biolith: World averages for trace elements contents in black

- shales and coals // International Journal of Coal Geology. – 2009. – V. 78, No. 2. – P. 135–148.
22. Арбузов С.И., Ершов В.В. Геохимия редких элементов в углях Сибири. – Томск: ИД «Д-Принт», 2007. – 468 с.
23. Арбузов С.И., Машенькин В.С. Радиоактивные элементы в каустобиолитах Северной Азии // Радиактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы V Международной конференции. – Томск, 2016. – С. 67–74.
24. Geochemistry of radioactive elements (U, Th) in coal and peat of northern Asia (Siberia, Russian Far East, Kazakhstan, and Mongolia) / S.I. Arbuzov, A.V. Volostnov, L.P. Rikhvanov, A.M. Mezhibor, S.S. Ilenok // Int. J. Coal Geol. – 2011. – V. 86. – P. 318–328.
25. Nature of Tonsteins in the Azeisk Deposit of the Ikutsk Coal Basin (Siberia, Russia) / S.I. Arbuzov, A.M. Mezhibor, D.A. Spears, S.S. Ilenok, M.V. Shal'dybin, E.V. Belaya // Int. J. of Coal Geology. – 2016. – V. 153. – P. 99–111. DOI: 10.1016/j.coal.2015.12.001.
26. Artamonova S.Yu. Technogenic fallout of Uranium and Thorium in the Vicinity of Novosibirsk (Russia, West Siberia) // Physics Procedia 84. – 2016. – V. 84. – P. 280–287.
27. Оценка аэротехногенного загрязнения в окрестностях угольных и нефтяных котельных по состоянию снегового покрова (на примере Томской области) / А.В. Таловская, Е.Г. Язиков, Т.С. Шахова, Е.А. Филимоненко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 10. – С. 116–130.
28. Voutsas D., Samara C. Labile and bioaccessible fractions of heavy metals in the airborne particulate matter from urban and industrial areas // Atmospheric Environment. – 2002. – V. 36. – № 22. – P. 3583–3590.
29. Charro E., Pardo R., Pena V. Statistical analysis of the spatial distribution of radionuclides in soils around a coal-fired power plant in Spain // Journal of Environmental Radioactivity. – 2013. – V. 124. – P. 84–92.
30. Insights into PM10 sources in Houston, Texas: Role of petroleum refineries in enriching lanthanoid metals during episodic emission events / A. Bozlaker, B. Buzcu-Güven, M.P. Fraser et al. // Atmospheric Environment. – 2013. – V. 69. – P. 109–117.
31. Mapping uranium concentration in soil: Belgian experience towards a European map / G. Cinelli, F. Tondeur, B. Dehandschutter, P. Bossew, T. Tollefsen, M. de Cort // Journal of Environmental Radioactivity. – 2017. – V. 166–2. – P. 220–234.
32. Assessment of metals contamination of soils of Ulaanbaatar, Mongolia / T. Batjargal, E. Otgonjargal, K. Baek, J.-S. Yang // Journal of Hazardous Materials. – 2010. – V. 184. – P. 872–876.
33. Alekseenko V., Alekseenko A. The abundances of chemical elements in urban soils // Journal of Geochemical Exploration. – 2014. – V. 147 (B). – P. 245–249.

Поступила 31.05.2017 г.

Информация об авторах

Гребенщикова В.И., доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск.

Грицко П.П., младший научный сотрудник Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск.

Кузнецов П.В., кандидат биологических наук, научный сотрудник Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва.

Дорошков А.А., кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск.

UDC 550.4:546.79(571.53)

URANIUM AND THORIUM IN SOIL COVER OF THE IRKUTSK-ANGARSK INDUSTRIAL ZONE (BAIKAL REGION)

Valentina I. Grebenshchikova¹,

vgreb@igc.irk.ru

Polina P. Gritsko¹,

rysy-a-87@mail.ru

Petr V. Kuznetsov²,

petr-kp@mail.ru

Artemy A. Doroshkov¹,

rendrom@gmail.com

¹ A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
1a, Favorsky street, Irkutsk, 664033, Russia.

² Center for ecological problems and productivity of forests RAS,
bld. 14, 84/32, Profsoyuznaya street, Moscow, 117997, Russia.

The problem is important due to increasing demand in research of radioactive elements distribution in soil cover of industrial cities with high man-caused load.

Objective: soil cover pollution level analysis in cities and suburban area according to the study of total contents of radionuclides (U, Th).

Methods of research: non-destructive X-ray fluorescence analysis using X-ray spectrometer S4 Pioneer made by Bruker AXS (Germany), statistical and mapping methods.

Results. Comparative chemical analysis of soil in the content of radionuclides U and Th and exposure dose rate survey has been held in two cities of Baikal region – Irkutsk and Angarsk. Soil samples analysis in the territory of Irkutsk city within specified earlier anomalous city zones confirmed the presence of relatively high Th and U concentration: Aircraft factory (U), Military warehouse (Th), several gasoline stands in city area, «Yunost» island (U). It is an interesting fact that the higher content of uranium and thorium is always detected in different places of the city. The content of uranium within 0,5–10,6 mg/kg and thorium within 1,8–30,8 mg/kg in soil cover of Angarsk city including residential, industrial zones and suburbs exceed regional level only in some local areas related to heat power objects. The higher content of uranium – 10,1–17 mg/kg and thorium – 29–44 mg/kg was detected in sludge samples from ash-disposal area.

Conclusions. Th and U gross contents survey in soil cover of industrial cities of Baikal region – Irkutsk and Angarsk, and their suburbs showed wide variability in values often exceeding average figures of Baikal region, but average content levels are very close. Irkutsk city local anomalies are characterized by a higher content of uranium in soils compared with those in Angarsk city which is due to the fact that industrial objects are outside the residential area in Angarsk. The increased content of thorium and uranium as well as exposure dose rate are registered in cover soils locally and in small areas around industrial facilities or at some distance from them indicating that content has aerotechnogenic origin. It was found that buffer capacity of ecosystems in the considered cities has not reached a critical level of radionuclides content and corresponds to the regional parameters.

Key words:

Soil cover, uranium, thorium, industrial and residential area, the EDR, sources of radionuclides.

REFERENCES

- Shaposhnikova L.M. Shuktomova I.I. Features of distribution of uranium, thorium and radium in the profile tehnopodzolistoy soil. *Successes of modern science*, 2016, no. 6, pp. 48–52. In Rus.
- Vodyanitskii Y.N. Chemical aspects of uranium behavior in soils: a review. *Eurasian Soils Science*, 2011, vol. 44, no. 8, pp. 862–873.
- Naprasnikova E.V. Biochemical characteristics of soils industrial city in Eastern Siberia. *Chemistry for sustainable development*, 2014, vol. 22, no. 5, pp. 483–488. In Rus.
- Guseva O.I., Gusev A.I. Radionuclides in some ecosystems of Mountain Altai. *Bulletin «Natural resources of Gorny Altai». Geoecology, hydrology and water resources*, 2011 (1), no. 14, pp. 142–153. In Rus.
- Koval P.V., Grebenshchikova V.I., Kitaev N.A. Geochemistry of the environment of the Baikal region. *Russian Geology and Geophysics*, 2000, vol. 41, no. 4, pp. 571–577.
- Chernyago B.P., Nepomnyashchikh A.I., Medvedev V.I. Modern radiation situation in the Central ecological zone of the Baikal natural territory. *Russian Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, no. 9, pp. 926–935.
- Gritsko P.P., Grebenshchikova V.I. The Content of uranium and thorium in the soil cover of territories of Irkutsk and its suburbs. *Environmental Engineering*, 2014, no. 1, pp. 26–38. In Rus.
- Gosudarstvenny doklad «O sostoyanii okruzhayushchey sredy Irkutskoy oblasti v 2014 godu [State report «On the state of the environment in Irkutsk region in 2014»]. Irkutsk, Forward Publ., 2015. 328 p.
- Grebenshchikova V.I., Lustenberg E.E., Kitaev N.A., Lomonosov I.S. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy Pribaykalya (Baykalsky geokologichesky poligon)* monografiya [Geochemistry of the environment of Baikal region (the Baikal geoeological polygon). Monograph]. Ed. by M.I. Kuzmin. Novosibirsk, Geo Academic publ. house, 2008. 234 p.
- Grebenshchikova V.I., Kitaev N.A., Lustenberg E.E., Medvedev V.I., Lomonosov I.S., Karchevsky A.N. The of Radioactive elements distribution in the environment of Pribaikale. Communication 1. Uranium. *Contemporary Problems of Ecology*, 2009, vol. 2, no. 1, pp. 12–21.

11. Grebenshchikova V.I., Kitaev N.A., Lustenberg E.E., Medvedev V.I., Lomonosov I.S., Karchevsky A.N. Radioactive elements distribution in the environment of Pribaikale. Communication 2. Thorium and cesium-137. *Contemporary Problems of Ecology*, 2010, vol. 3, no. 3, pp. 346–355.
12. Grebenshchikova V.I. Geochemical specificity of the composition of the snow water of some cities of Irkutsk region. *Water: chemistry and ecology*, 2013, no. 2, pp. 19–25. In Rus.
13. Kuznetsov P.V., Grebenshchikova V.I., Aisueva T.S. Evaluation of the contents of uranium and thorium in soils of the city Chermkhovo (Irkutsk region) and its surroundings in connection with the extraction and combustion of coal. *Biosphere*, 2013, vol. 5, no. 2, pp. 51–57. In Rus.
14. Khalbaev V.L., Grebenshchikova V.I. Ecological and geochemical characteristic of soils of Irkutsk and its surroundings. *Inzhenernaya Ekologiya*, 2013, no. 1, pp. 33–45. In Rus.
15. Vinogradov A.P. *Geokhimiya redkikh i rasseyanykh khimicheskikh elementov v pochvakh* [Geochemistry of rare and dispersed chemical elements in soils]. Moscow, Publ. house of the USSR Academy of Sciences, 1957. 237 p.
16. Bowen H.J.M. *Environmental chemistry of the elements*. London, Academic Press, 1979. 333 p.
17. Boguslavskiy A.E., Gaskova O.L., Shemelina O.V. Migration of uranium in groundwater of district sludge Angarsk electrolysis chemical complex. *Chemistry for sustainable development*, 2012, no. 20, pp. 515–529. In Rus.
18. Ahmed H., Young S.D., Shaw G. Factors affecting uranium and thorium fractionation and profile distribution in contrasting arable and woodland soils. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, vol. 145, pp. 98–105.
19. Rikhvanov L.P. radioaktivnye element v pochvakh Sibiri [Radioactive elements in soils of Siberia]. *Radioaktivnost i radioaktivnye element v srede obitaniya cheloveka. Materialy IV mezhdunarodnoy konferentsii* [Radioactivity and radioactive elements in human environment. Proceedings of the IV International conference]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2013, pp. 448–451.
20. Yazikov E.G., Talovskaya A.V., Zhorniyak L.V. *Otsenka geologo-geokhimicheskogo sostoyaniya territorii g. Tomsk po dannym izucheniya pyleaerozoley i z pochv* [Assessment of ecological-geochemical state of the territory of Tomsk according to the study of pleurosira and soil]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2010. 264 p.
21. Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of Cakes for carbonaceous biolith: World averages for trace elements contents in black shales and coals. *International Journal Coal Geology*, 2009, vol. 78, no. 2, pp. 135–148.
22. Arbuzov S.I., Ershov V.V. *Geokhimiya redkikh elementov v uglyakh Sibiri* [Geochemistry of rare elements in coals of Siberia]. Tomsk, D-Print Publ. house, 2007. 468 p.
23. Arbuzov S.I., V.S. Maschenkin. Radioaktivnye element v kaus-tobilitakh Severnoy Azii [Radioactive elements in caustobiolith of Northern Asia]. *Radioaktivnost i radioaktivnye element v srede obitaniya cheloveka: Materialy V Mezhdunarodnoy konferentsii* [Radioactivity and radioactive elements in human environment. Materials of V International conference]. Tomsk, 2016, pp. 67–74.
24. Arbuzov S.I., Volostnov A.V., Rikhvanov L.P., Mezhibor A.M., Ilenok S.S. Geochemistry of radioactive elements (U, Th) in coal and peat of northern Asia (Siberia, Russian Far East, Kazakhstan, and Mongolia). *Int. J. Coal Geol.*, 2011, vol. 86, pp. 318–328.
25. Arbuzov S.I., Mezhibor A.M., Spears D.A., Ilenok, S.S., Shal'dybin M.V., Belaya E.V. Nature of Tonsteins in the Azeisk Deposit of the Irkutsk Coal Basin (Siberia, Russia). *Int. J. of Coal Geology*, 2016, vol. 153, pp. 99–111. DOI: 10.1016/j.coal.2015.12.001.
26. Artamonova S.Yu. Technogenic fallout of Uranium and Thorium in the Vicinity of Novosibirsk (Russia, West Siberia). *Physics Procedia* 84, 2016, vol. 84, pp.280–287.
27. Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Shakhova T.S., Filimonenko E.A. Evaluation of coal and oil boiler of environmental contamination in the vicinity as the snow cover (for example, the Tomsk region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 10, pp. 116–130.
28. Voutsas D., Samara S. Labile and bioaccessible fractions of heavy metals in the airborne particulate matter from urban and industrial areas. *Atmospheric Environment*, 2002, vol. 36, no. 22, pp. 3583–3590.
29. Charro E., Pardo R., Pena V. Statistical analysis of the spatial distribution of radionuclides in soils around a coal-fired power plant in Spain. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2013, vol. 124, pp. 84–92.
30. Bozlaker A., Buzcu-Güven B., Fraser M.P. Insights into PM10 sources in Houston, Texas: Role of petroleum refineries in enriching lanthanoid metals during episodic emission events. *Atmospheric Environment*, 2013, vol. 69, pp. 109–117.
31. Cinelli G., Tondeur F., Dehandschutter B., Bossew P., Tollefsen T., De Cort M. Mapping uranium concentration in soil: Belgian experience towards a European map. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, vol. 166–2, pp. 220–234.
32. Batjargal T., Otgonjargal E., Baek K., Yang J.-S. Assessment of metals contamination of soils of Ulaanbaatar, Mongolia. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, vol. 184, pp. 872–876.
33. Alekseenko V., Alekseenko A. The abundances of chemical elements in urban soils. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, vol. 147 (B), pp. 245–249.

Received: 31 May 2017.

Information about the authors

Valentina I. Grebenshchikova, Dr.Sc., A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS.

Polina P. Gritsko, assistant, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS.

Petr V. Kuznetsov, Cand. Sc., Center for ecological problems and productivity of forests RAS.

Artemy A. Doroshkov, Cand. Sc., A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS.

УДК 553.242.4:167–047.58

ПРОБЛЕМЫ РУДНОЙ ГЕОЛОГИИ И ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР. ЧАСТЬ 1. МИНЕРАЛОГО–ПЕТРОХИМИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ ОКОЛОЖИЛЬНЫХ МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ ОРЕОЛОВ В МЕЗОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЗОЛОТА: ТЕОРИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТ, ПРИРОДА

Кучеренко Игорь Васильевич,

kivr@tpu.ru

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

Актуальность работы. В реконструкции процессов образования мезотермальных месторождений цветных металлов, золота, урана существуют проблемы, решения которых не найдены до сего времени в течение многих десятилетий, некоторых – более столетия. Очевидная необходимость корректных решений этих проблем для углубления – развития – теории гидротермального рудообразования и совершенствования комплексов прогнозно-поисковых критериев оруденения стимулирует поиск и устранение объективных и, возможно, субъективных причин, обуславливающих бесконечные дискуссии, ранее оправданных дефицитом достоверных данных, но ставших более понятными по мере накопления новых знаний.

Цель. Для реконструкций природных процессов и устранения оцениваемых автором как субъективные причин разногласий предложены и обсуждаются известные ранее и авторские решения следующих ключевых дискуссионных проблем рудной геологии: 1) проблемы формирования околорудной метасоматической зональности, в частности, в околоразломном) ее варианте; 2) проблемы источников золота, сосредоточенного в рудах среди кристаллического субстрата и черных сланцев; 3) проблемы обусловленности образования мезотермальных месторождений золота магматизмом; 4) проблемы формационной типизации месторождений твердых полезных ископаемых как средства реализации объективно приоритетного в сочетании с дедуктивным индуктивным способом познания процессов рудообразования.

Методы исследования. Для решения каждой проблемы: 1) выполнен анализ фактологической базы существующих представлений на предмет оценки их корректности и соответствия современным данным; 2) приведены и обсуждаются авторские материалы, предлагаемые для обоснования альтернативных существующим, как представляется, корректных решений проблем.

Результаты. В рамках решения первой проблемы посредством анализа результатов минералого-петрохимического изучения зональных колонок березитовой метасоматической формации, образованных в плутонических и вулканических основного, среднего, кислого составов, метаморфических разных фаций, осадочных, включая черные сланцы, породах в девятнадцати золоторудных мезотермальных месторождениях южного горно-складчатого обрамления Сибирского кратона показано несоответствие следующей из теории метасоматической зональности Д.С. Коржинского теоретической модели природным метасоматическим колонкам – не достигается предписанная теорией «мономинеральность» тыловой зоны. Последняя, как и в экспериментальных колонках, «полиминеральна», а число новообразованных минералов в ней, включая рудные, сопоставимо с числом минералов в исходных породах или превосходит его. «Полиминеральность» тыловых зон обусловлена доказанной балансовыми расчетами межзональной миграции петрогенных компонентов встречной из трещинного раствора в поровый боковых пород и из порового раствора в трещинный диффузией компонентов, а также пульсационным (порционным) режимом поступления различающихся в последовательных порциях по термодинамическим, физико-химическим параметрам, составам, концентрациям растворенных веществ металлоносных флюидов в области породы-рудообразования. В теории метасоматической зональности, опирающейся на явление дифференциальной подвижности компонентов в изменяющихся термодинамических, физико-химических условиях и законы термодинамики, не учтены упомянутые известные в годы разработки теории природные факторы, определяющие формирование зональности околоразломных метасоматических колонок, вероятно, в большей степени в сравнении с использованными в существующей теории. Негативное влияние человеческого фактора на результаты исследования проблемы выражается также в необъясненном исключении из оценки жизнеспособности теории обязательной процедуры соотношения теоретической модели метасоматической зональности с созданной природой, в результате которого необходимость коррекции теории в околоразломном (околоразломном) варианте с целью трансформации ее в жизнеспособную стала бы очевидной.

Ключевые слова:

Мезотермальные месторождения золота, теоретическая, экспериментальная, природная модели околоразломных метасоматических колонок пропилит-березитового минералого-петрохимического профиля, природные факторы, определяющие минералого-петрохимическую зональность околоразломных метасоматических колонок, человеческий фактор и его негативное влияние на решение проблемы.

1. Постановка задачи

Объективно обусловленный индуктивный способ познания геологических процессов предполагает, как известно, реконструкцию содержания и последовательности их функционирования посредством изучения оставленных ими вещественных «следов» – ассоциаций минералов, горных пород, структур с последующей интерпретацией условий их образования. Элементы дедуктивного способа познания – теоретические разработки, мо-

делирование, эксперимент – сохраняют в этом случае преимущественно вспомогательное значение, поскольку невозможно понять, как действует природа, создавая, скажем, месторождения полезных ископаемых, как «работают» законы химии, физики, механики, термодинамики без предварительного изучения устройства месторождений, минеральных, химических составов пород и руд, их соотношений и эволюции в пространстве и времени, а также без других данных, которые могли бы

быть использованы для познания процессов рудообразования.

В рудной геологии существуют проблемы, решавшиеся в течение многих десятилетий, но не решенные до сих пор, обсуждаемые или пребывающие в забвении. В приложении к мезотермальным месторождениям золота и других металлов к их числу, в частности, относятся:

- проблема формирования околорудной метасоматической зональности, в том числе, в около-разломном (околожилном) ее варианте;
- проблема источников золота и других сопровождающих его металлов, сосредоточенных в рудах гидротермальных месторождений, образованных среди кристаллического субстрата и черных сланцев;
- проблема связей (обусловленности образования) мезотермальных месторождений золота и других металлов с магматизмом, сопряженная с предыдущей проблемой и проблемой обусловленности рудообразования региональным метаморфизмом;
- проблема формационной типизации месторождений твердых полезных ископаемых многоцелевого назначения, пребывающая в забвении, но сохранившая актуальность после длительных попыток ее решения в шестидесятых–восьмидесятых годах прошлого столетия.

Тот факт, что перечисленные проблемы, имеющие очевидное теоретическое и прикладное прогностно-поисковое значение, изучаются и обсуждаются в отечественной и зарубежной литературе столь длительное время – столетие, без признаков скорого их решения, имеет свою объективную и субъективную причины.

Первая заключается в том, что накопление новых данных, способствующих решению проблем, их конвертация в новое знание и тем самым углубление (развитие) теории рудообразования сопряжены с объективными обстоятельствами – дефицитом фактов, обусловленным не всегда преодолимыми (преодоленными) трудностями или реальными возможностями их сбора, не всегда возможными корректными способами их интерпретации и другими.

Вторая причина, квалифицированная как «человеческий фактор», оказывает негативное, как правило, сильное влияние на процесс познания в обсуждаемой области, способное затормозить и даже «заморозить» на какое-то время развитие теории.

Человеческий фактор заключается в том, что в исследовательской практике, ориентированной на решение, в частности, перечисленных проблем, индуктивный подход, опирающийся на приоритет эмпирических (наблюдаемых в природе) данных над теоретическими построениями, заменяется приемами дедуктивного подхода – идеи, не согласованные с эмпирическими данными или даже «оторванные» от них, трансформированные в рабочие гипотезы, подвергаются теоретической раз-

работке, как правило, экспериментальной проверке. Однажды принятая или заменившая предшествующую кажущаяся рациональной предложенная авторитетом руководящая идея представляется единственно верной большей части занятого решением обсуждаемых проблем ученого сообщества и определяет, нередко без надлежащего разностороннего анализа и обсуждения других возможных путей их решения, методологию и методы дальнейших исследований. Вероятно, вследствие этого реализация руководящей идеи на практике излишне часто по прошествии времени заводит решение соответствующей ей проблемы в тупик. Это происходит в тех случаях, когда по объективным или субъективным причинам в принятии решения не учтены влияющие на него факты – неизвестные и даже ставшие известными, накопившиеся в процессе исследования, но не укладываемые в «приоритетную» руководящую идею, кажущиеся не заслуживающими содержательного обсуждения, тем более учета и использования. При этом обязательная оценка соответствия результатов – научных положений, выводов реальной природной ситуации как критерий их достоверности – жизнеспособности, иногда остается за рамками исследования. Пренебрежение этой прописной истиной влечет за собой как неизбежное следствие конкурирующие гипотезы, но мало достоверного знания.

В цикле статей под общим обозначенным названием приведены и анализируются материалы, иллюстрирующие негативное влияние человеческого фактора на углубление теории гидротермального рудообразования в составе и содержании некоторых перечисленных ключевых проблем, предлагаются и обсуждаются способы снижения его влияния и/или нейтрализации.

2. Модели околоразломной (околожилной) минералого-петрохимической зональности метасоматических колонок

Совокупность геологических ситуаций образования эндогенных метасоматических пород включает эндо-экзоконтактовые области остывающих интрузий (контактовый метасоматизм, сопровождаемый образованием рудоносных известковых, магнезиальных, силикатных скарнов), разогретые поступающими извне горячими растворами приконтактовые области химически разнородных пород (контактово-реакционный метасоматизм), горные породы в обрамлении разломов, в том числе выполняемых рудоносными кварцевыми жилами (околожилный метасоматизм). В последнем случае в кварцевых жилах и минерализованных зонах локализованы руды Sn, W, Mo, Ta, Nb, Be, Li, Rb, Cs, U в сопровождении метасоматитов грейзеновой формации, Au, Ag, U, Pb, Zn (Cu), Sb в сопровождении ореолов березитовой формации, Hg, Sb, Au, Ag, Sn, Mo, U в сопровождении метасоматитов аргиллизитовой формации.

Во всех случаях метасоматические ореолы – колонки – обладают минералого-петрохимической зональностью, условия формирования которой регламентируются гидродинамическими, термодинамическими, физико-химическими режимами в системах горная порода – горячий раствор, свойствами, концентрациями (химическими потенциалами) участвующих в реакциях компонентов – условиями, которые обобщены в разработанной Д.С. Коржинским единственной теории метасоматической зональности [1, 2].

В основу теории заложено известное явление дифференциальной подвижности химических элементов – их способности в конкретных условиях среды находиться в растворенном или инертном в составе минералов состоянии, в зависимости от эволюции условий среды быть более или менее подвижными, более или менее инертными. Совокупность основных минералообразующих компонентов разделена Д.С. Коржинским [1] на четыре группы: наиболее подвижных (H_2O , CO_2), подвижность которых возрастает с увеличением соответственно температуры или давления; весьма подвижных при всех условиях (S, Cl, Na, K), подвижных при определенных условиях (O_2 , Si, Mg, Ca, Fe), инертных при всех условиях (Al, P, Ti).

2.1. Теоретическая модель околожильной метасоматической колонки березитового минералого-петрохимического профиля

В околоразломном варианте метасоматический процесс в образующихся мезотермальных месторождениях перечисленных металлов инициируется поступлением в разломы, трещины горячих флюидно-флюидов и созданием породно-флюидной системы, в которой застойный поровый раствор сочетается, согласно теории, с фильтрующимся по разломам, трещинам раствором.

Застойный режим поровых растворов доказывался участием в околоразломных метасоматитах новообразованных минералов переменного, изменяющегося вдоль и вкост простирания каждой минеральной зоны метасоматических колонок, состава вследствие непрерывного изменения свойственного диффузионным колонкам, в отличие от фильтрационных колонок, в всем их протяжении химического потенциала каждого компонента [2]. Доказывающий застойный режим поровых растворов боковых пород концентрационно-диффузионный механизм массопереноса в процессе околоразломного метасоматизма выражен также в межзональной и внутризональной миграции петрогенных компонентов в объемах формирующихся колонок из областей более высоких их концентраций в области более низких в направлении выравнивания концентраций [3].

Вместе с тем декларируемая в теории фильтрация трещинных растворов по разломам при застойном режиме поровых опровергается многочисленными фактами пространственно-временной сопряженности рудных столбов в кварцевых жи-

лах осевой зоны метасоматических колонок и контрастных аномалий металлов в боковых породах смежной тыловой (березитовой) зоны при незначительно повышенных (субкларковых) содержаниях металлов в породах напротив безрудных участков жил [3].

Согласно теории метасоматической зональности, в условиях непрерывного поступления горячих растворов от начала до завершения процессов при диффузионном метасоматизме в обрамлении разломов образуется зональная метасоматическая колонка, которая включает резко отграниченные одновременно образованные минеральные зоны с уменьшением в каждой более тыловой зоне числа минералов на единицу, сопровождаемом переходом по одному компоненту из инертного в подвижное состояние вплоть до тыловой мономинеральной зоны или зоны полного растворения. Переходящие в подвижное состояние компоненты удаляются из системы. На границах минеральных зон – фронтах замещения – полностью замещается только один минерал, так как скорость продвижения фронтов замещения разных минералов различна. Возникшие минеральные зоны в процессе метасоматизма постоянно разрастаются с замещением внешних зон внутренними, то есть посредством надвига более тыловых зон на более фронтальные.

В случаях пересыщенности трещинного раствора поступившими с ним компонентами в боковых породах могут возникнуть фронты замещения, по обе стороны которых, то есть в смежных минеральных зонах, число минералов не изменяется или возрастает. Это происходит вследствие диффузии компонентов из трещинного раствора в поровый посредством заполнения пустот – одновременного образования всех минералов, содержащих пересыщающие трещинный раствор компоненты. Взаимодействие с минералами пород компонентов раствора может сопровождаться увеличением числа реакционных минералов. Однако заполняющие пустоты и реакционные новообразованные минералы при дальнейшем взаимодействии с компонентами раствора замещаются, растворяются, их число уменьшается «вплоть до мономинеральности» тыловой (осевой) зоны – кварцевой жилы.

Таким образом, ключевое следствие – вывод – из термодинамической теории метасоматической зональности Д.С. Коржинского заключается в том, что в процессе околоразломного метасоматизма система «порода – трещинный – поровый горячие растворы» открыта преимущественно в сторону выноса слагающего породы вещества, в итоге кроме одного, в кислотных метасоматитах – кремнезема, не растворимого в кислотных растворах.

На примере березитовой метасоматической колонки, в которой березит занимает некое промежуточное положение, вывод иллюстрируется следующей сменой минеральных зон [1]: минеральная зона березита, сложенного типовым для него агрегатом кварца, серицита, анкерита, пирита, рутила,

сменяется смежными более тыловыми зонами, в которых исчезают сначала анкерит, а затем пирит, или сначала пирит, а затем анкерит. Смежная с осевой, согласно теории, – мономинеральной кварцевой жилой тыловая зона сложена кварцем, серицитом с примесью рутила. В ней, в отличие от более фронтальных зон, «почти не сохраняются» [1. С. 446] реликтовые минералы исходного гранит-порфира, но образуется рутил – минерал титана, инертного «при всех условиях».

2.2. Экспериментальная модель околоразломной минералого-петрохимической зональности метасоматической колонки березитового профиля

Корректным доказательством жизнеспособности теории природного процесса, как известно, служит соответствие (адекватность) следующей из теории его модели созданному природой объекту или природному явлению. Представляют интерес также результаты экспериментов, к интерпретации которых, однако, приходится относиться с осторожностью вследствие объективно обусловленной невозможности моделировать, в частности, геологическое время – один из факторов, влияющих на ход и результаты химических реакций.

В экспериментах, ориентированных на получение метасоматической колонки березитового минералого-петрохимического профиля, воспроизводящих диффузионный механизм массопереноса, создавались условия, реконструированные при изучении природных метасоматических колонок, имитирующие околоразломный средне-низкотемпературный при постоянном давлении 1000 бар кислотный метасоматизм. Цель экспериментов – оценить влияние температуры, кислотности, концентрации K в растворе на стабильность березитовых парагенезисов в составе кварц + серицит + анкерит ± пирит ± хлорит ± альбит ± калиевый полевой шпат.

В качестве исходной породы в опытах использовался гранодиорит или кварцевый диорит, измельченный до фракции менее 0,07 мм. Проба запрессовывалась в золотую или платиновую пробирку диаметром 5 мм, длиной 50 мм [4]. Пробирка помещалась в автоклав с тем, чтобы воздействующий раствор свободно контактировал с породой со стороны открытого конца пробирки. В раствор добавлялся KCl до достижения концентрации 0,1 или 1,0 М, кислотность раствора регулировалась добавлением HCl или элементарной S от 0,001 до 0,1 М, дополнительно вводилась углекислота ($X_{CO_2}=0,1$) и до насыщения раствора – аморфный кремнезем в виде порошка. Объем раствора превышал объем породы в 100 раз.

Опыты выполнялись в течение 2 недель, некоторые длились до 4 месяцев. Полученные в результате зональные метасоматические колонки изучались оптическими и рентгеновскими методами, химические составы минералов определялись на рентгеновском микроанализаторе «Camebax».

В результате ранних экспериментов [4] получены зональные метасоматические колонки двух типов (табл. 1), различающиеся лишь деталями. Детали заключаются в образовании в одной из промежуточных минеральных зон калиевого полевого шпата в случае повышенных значений в системе отношения K^+/H^+ и в замене в тыловой зоне пирита хлоритом при отсутствии в системе серы. Отмечается и другая особенность экспериментальных колонок – участие в составе промежуточных зон анкерита, в том числе в ассоциации кварц + серицит + анкерит, отсутствующего в тыловых зонах. В прифронтальных зонах, граничащих с исходной породой, анкерит постепенно сменяется кальцитом. В относительно низкотемпературных (менее 250 °C) условиях в промежуточных зонах вместо анкерита кристаллизовался карбонат брейнеритового ряда.

Таблица 1. Порядок минеральной зональности экспериментальной диффузионной метасоматической колонки [4]

Table 1. Order of mineral zoning of the experimental diffusional metasomatic column [4]

Тип а/Type a						
Кв	Кв	Кв	Кв	Кв	Кв	Кв
Сер	Сер	Сер	Сер	Сер	Пл	Пл
			Пл	Пл	Амф	Би
Пир	Пир	Анк	Анк	Анк	Би	Амф
				Ка	Ка	
			Хл	Хл	Хл	Хл
Раствор Solution					Исходная порода Initial rock	
Тип б/Type b						
Кв	Кв	Кв	Кв	Кв	Кв	Кв
Сер	Сер	Сер	Пл	Пл	Пл	Пл
			Кпш		Би	Би
Пир	Пир	Анк	Анк	Анк	Амф	Амф
				Ка	Ка	
			Хл	Хл	Хл	Хл

Примечание. Кв – кварц, Пл – плагиоклаз, Би – биотит, Амф – амфибол, Хл – хлорит, Ка – кальцит, Анк – анкерит, Кпш – калиевый полевой шпат, Сер – серицит, Пир – пирит.

Note. Кв – quartz, Пл – plagioclase, Би – biotite, Амф – amphibole, Хл – chlorite, Ка – calcite, Анк – ankerite, Кпш – orthoclase, Сер – sericite, Пир – pyrite.

Согласно сформулированному в результате ранних экспериментов выводу, в заданных условиях (1000 бар, $X_{CO_2}=0,1$) поле стабильности березитов со стороны высоких температур ограничено значением 340 °C, а при более низких температурах, отвечающих нижнему пределу гомогенного состояния флюидов в данных условиях, – 240 °C, при этом стабильность парагенезисов березитов сохраняется в интервале $lg(K^+/H^+)=2,9...5,6$. При наиболее вероятной в природных растворах концентрации K в диапазоне 0,01...1,0 М величина рН в обсуждаемых условиях, приемлемая для образования березитов, составляет 1,7...4,9 при $T=310$ °C

и 2,9...7,6 при $T=240^{\circ}\text{C}$. Авторы экспериментов [4] предполагают образование березитов в породно-флюидных системах при $P<1000$ бар и X_{CO_2} не $>0,1$, в этом случае – при $T<340^{\circ}\text{C}$.

Образованная в описанных условиях ранних экспериментов, но в отсутствие серы, метасоматическая колонка включает минеральные зоны [5], перечисленные в табл. 2.

Таблица 2. Порядок минеральной зональности экспериментальной диффузионной метасоматической колонки в гранодиорите [5]

Table 2. Order of mineral zoning of the experimental diffusional metasomatic column in granodiorite [5]

Минеральные зоны Mineral zones	Минеральный состав Mineral composition
Фронтальная (гранодиорит) Frontal (granodiorite)	кварц, хлорит, калиевый полевой шпат, <u>плаггиоклаз</u> , <u>биотит</u> , <u>амфибол</u> quartz, chlorite, feldspar, <u>plagioclase</u> , <u>biotite</u> , <u>amphibole</u>
1 ^я промежуточная 1 intermediate	кварц, серицит, хлорит, анкерит, <u>калиевый полевой шпат</u> quartz, sericite, chlorite, ankerite, <u>feldspar</u>
2 ^я промежуточная 2 intermediate	кварц, серицит, хлорит, <u>анкерит</u> quartz, sericite, chlorite, <u>ankerite</u>
Тыловая Rear	кварц, серицит, хлорит quartz, sericite, chlorite

Примечание. 1) Условия эксперимента: углекислотный раствор без серы, $P=1$ кбар, $X_{\text{CO}_2}=0,1$, $KCl=1,0$ М, избыток SiO_2 . 2) Здесь и далее подчеркнуты минералы, исчезающие в более тыловых зонах

Note. 1) The conditions of the experiment: coal acid solution without sulphur, $P=1$ kbar, $X_{\text{CO}_2}=0,1$, $KCl=1,0$ M, surplus of SiO_2 . 2) The minerals disappearing in more rear zones are underlined

Авторы экспериментов считают, что парагенезис кварц + серицит + хлорит отвечает обширной совокупности метасоматитов кварц-серицитового состава, но присутствие в числе новообразований в промежуточных зонах анкерита или образованного при температуре ниже 300°C брейнерита сближает метасоматит с березитом в специфическом составе кварц + серицит + хлорит, в котором при отсутствии серы, как отмечалось, вместо пирита образован хлорит. Данную породу, вероятно, следует считать фациальной разновидностью березита.

В более поздних экспериментах в качестве исходной породы использовался дробленный кварцевый диорит, запрессованный в титановый вкладыш объемом 150 см^3 , который, в свою очередь, помещался в автоклав, заполненный смесью H_2O и CO_2 [6]. Углекислоту ($X_{\text{CO}_2}=0,01...0,2$) в систему вводили в виде твердого сухого льда и в составе щавелевой кислоты, которая разлагалась при нагревании с выделением CO_2 . Кислотность раствора регулировалась добавлением KCl в концентрации от 10^{-2} до $3,0$ М. Селу (порошок) вводили в элементарном виде с достижением концентрации $10^{-3}...0,6$ моль/кг H_2O . Раствор насыщался кремнеземом в составе измельченного кварца и аморфной массы. Опыты выполнялись при $T=500...200^{\circ}\text{C}$, $P=0,5...3$ кбар в течение 2 недель. Определялись не только химические составы минералов, но и горных пород, слагающих минеральные зоны.

Все полученные колонки зональны и характеризуются уменьшением числа минералов в направлении к тыловой зоне, хотя его (уменьшение) следует рассматривать скорее как тенденцию. Одна из

Таблица 3. Порядок минералого-петрохимической зональности экспериментальной диффузионной метасоматической колонки березитового профиля [6]

Table 3. Order of mineral-petrochemical zoning of the experimental diffusional metasomatic column of the beresite type [6]

Номера зон Numbers of zones	Мощность, мм Thickness, mm	Минеральный состав зон Mineral composition of zones	Содержание, мас. %/Content, wt. %									
			SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	S	CaO	MgO	FeO	TiO_2	Σ
0	–	Кварцевый диорит/Quartz diorite	47,2	14,4	0,9	2,9	не ан.	5,2	3,0	5,2	0,35	79,15
1 Фронтальная Frontal	26,0	Кварц + серицит + кальцит + хлорит + плаггиоклаз + (биотит) + амфибол Quartz + sericite + calcite + chlorite + plagioclase + (biotite) + amphibole	48,5	14,3	1,3	2,6	не ан.	5,4	2,9	5,1	0,35	80,45
2	8,5	Кварц + серицит + анкерит + хлорит + <u>кальцит</u> + (плаггиоклаз, биотит, <u>амфибол</u>) Quartz + sericite + ankerite + chlorite + <u>calcite</u> + (plagioclase, biotite, <u>amphibole</u>)	48,1	15,0	1,5	2,5	не ан.	5,3	2,9	5,2	0,35	80,85
3	4,2	Кварц + серицит + анкерит + пирит + <u>хлорит</u> + (плаггиоклаз, <u>биотит</u>) Quartz + sericite + ankerite + pyrite + <u>chlorite</u> + (plagioclase, <u>biotite</u>)	46,5	14,0	2,0	2,5	0,2	4,9	3,0	5,4	0,35	78,85
4	1,0	Кварц + серицит + анкерит + пирит + (плаггиоклаз) Quartz + sericite + ankerite + pyrite + (plagioclase)	47,6	14,4	3,0	2,4	1,5	5,3	2,6	5,3	0,35	82,45
5 Тыловая/Rear	0,3	Кварц + серицит + пирит + (анкерит) Quartz + sericite + pyrite + (ankerite)	36,6	14,6	3,7	0,5	3,0	2,1	1,6	4,8	0,35	67,25

Примечание. В скобках приведены реликтовые минералы.

Note. Relict minerals are in round brackets.

типичных колонок образована при воздействии на породу кислого раствора с $pH=2,8$ (табл. 3).

В отличие от высокотемпературных метасоматитов, образованных в условиях кислотного выщелачивания, в минеральных зонах обсуждаемых колонок сохраняются реликтовые минералы исходной породы, а тыловая зона мощностью около 1 мм полиминеральна – сложена березитом в составе кварца, серицита, анкерита, пирита. Иногда формируются «дополнительные» (смежные) минеральные зоны [4, 5] без изменения числа минеральных фаз. Это происходит, как считают авторы экспериментов, в случаях высокой кислотности растворов, при которой анкерит частично, с сохранением лишь реликтов, растворяется. Как отмечают авторы экспериментов, изменение минеральных составов минеральных зон сопровождается слабо выраженной межзональной миграцией в сторону привноса – выноса компонентов – во фронтальной и промежуточных зонах содержания большинства компонентов сохраняются примерно на одном уровне с содержаниями их в исходной породе. Миграционная активность их повышается только в тыловой зоне, из которой частично удалены SiO_2 , Na_2O , CaO , MgO , FeO , но в которую дополнительно поступили K_2O , S и CO_2 . При этом остались максимально инертными Al_2O_3 и TiO_2 .

2.3. Природная модель околожильной минералого-петрохимической зональности метасоматической колонки пропилит-березитового профиля

Типовая модель околоразломной (околожильной) созданной природой метасоматической зональности (табл. 4) разработана на основе изучения автором структуры, минерального, химического составов околорудных метасоматических ореолов (колонок), образованных в золоторудных месторождениях Кодаыр, Восточном (Юго-Восточный Казахстан, поздний палеозой), Центральном, Бериккульском (Кузнецкий Алатау, ранний палеозой), Зун-Оспа, Зун-Холба (Восточный Саян, средний палеозой), Западном, Ирокиндинском, Кедровском, Петелинском, Богодиканском, Верхне-Сакуканском, Каралонском, Уряхском (Северное Забайкалье, поздний палеозой), Сухоложском, Вернинском, Медвежьем (Ленский район, средний палеозой), Чертово Корыто, (Патомское нагорье, поздний палеозой). Исходные горные породы, вмещающие золотоносные кварцевые жилы, минерализованные зоны, сопровождаемые метасоматическими ореолами, представлены кислыми, средними, основными плутоническими, вулканическими, метаморфическими разных фаций, осадочными, включая черные сланцы, породами [3, 7–9 и др.].

Занятые ореолами объемы земной коры определяются проницаемостью среды – в трещиноватых породах их ширина достигает многих сотен – первых тысяч метров, в массивных, например гранитоидах, нередко не превышает десятков метров. Во

всех случаях ширина минералого-петрохимических зон в колонках последовательно уменьшается от фронтальной наиболее объемной зоны к малообъемной тыловой, ширина которой в массивных породах нередко не превышает 1...5 см. В некоторых колонках тыловая зона отсутствует.

В черносланцевых толщах и в мощных зонах разломов обычное явление – чередование в поперечных разрезах ореолов минералого-петрохимических зон в разных сочетаниях, обусловленное, в свою очередь, чередованием тектонических швов с разной проницаемостью – в обрамлении более проницаемых швов происходит более интенсивное преобразование пород.

Границы между периферийными (фронтальной, хлоритовой) минералого-петрохимическими зонами фиксируются, как правило, резкие (нитевидные), между тыловыми – постепенные («размытые»); в последнем случае переходы между зонами происходят в интервале нескольких мм посредством снижения числа реликтов замещающего минерала в направлении тыловой зоны. В тыловых альбитовой и березитовой зонах строение пород приобретает универсальные черты – массивная текстура метасоматитов заменяет разнообразные текстуры, гранобластовая, гранолепидобластовая, порфириобластовая структуры заменяют разнообразные структуры исходных пород.

Большинство новообразованных минералов участвует в минеральном составе всех минералого-петрохимических зон. Исключение составляют актинолит и тремолит, хлорит и эпидот, альбит, которые замещаются на границах соответственно фронтальной и хлоритовой (эпидотовой), хлоритовой (эпидотовой) и альбитовой, альбитовой и тыловой зон. Замечено увеличение массы новообразованных минералов перед внутренней границей их исчезновения в каждой смежной более тыловой зоне. Возрастает общая масса минеральных новообразований в направлении к тыловой зоне с полным растворением в последней (кроме кварца, карбонатов, мусковита) всех минералов исходных пород.

Возрастание массы карбонатов в промежуточной хлоритовой (эпидотовой) и тыловых зонах сопровождается укрупнением их кристаллов – ромбоэдров до 5 мм в поперечнике и изменением их составов в сторону увеличения магнезиальности и железистости.

В одном из месторождений (Зун-Оспа) обнаружено отклонение от типовой модели метасоматической зональности, которое выражается в минеральном составе тыловой зоны апогранитных метасоматических колонок, обрамляющих золоторудные кварцевые жилы № 1, 5, 6. В составе метасоматита диагностированы кварц, серицит, рутил, лейкоксен, магнетит, пирит, Mg-Fe хлорит, но отсутствуют свойственные березиту Mg-Fe карбонаты, которые участвуют в составе метасоматитов более фронтальных зон, в том числе в смежной с тыловой зоной, сложенной кварцем, серицитом, рутилом, лейкоксеном, магнетитом, пиритом, хлори-

том, доломитом-анкеритом, магнезитом. Присутствие в тыловой зоне природных колонок хлорита сближает их с экспериментальными колонками [4, 5] (табл. 1, 2), полученными при дефиците или отсутствии в растворах серы (табл. 2), как следствие, в метасоматитах – сульфидов (пирита).

Таблица 4. Порядок минеральной зональности природной типовой диффузионной околожильной метасоматической колонки пропилит-березитового профиля

Table 4. Order of the mineral zoning of the natural standard-type diffusional near-vein metasomatic column of propilite-beresite type

Минеральные зоны Mineral zones	Минеральный состав Mineral composition
Фронтальная Frontal	(пироксены ± амфиболы ± полевые шпаты ± биотит ± мусковит ± кварц) + серицит ± лейкоксен ± рутил ± магнетит ± пирит ± кальцит + альбит ± (кероген) ± хлориты ± цоизит ± актинолит ± тремолит (pyroxenes ± amphiboles ± feldspars ± biotite ± muscovite ± quartz) + sericite ± leucoxene ± rutile ± magnetite ± pyrite ± calcite + albite ± (kerogene) ± chlorites ± zoisite ± actinolite ± tremolite
Хлоритовая (эпидотовая, эпидот-хлоритовая) Chloritic (epidotic, epidote-chloritic)	(полевые шпаты ± кварц) ± кварц + серицит ± лейкоксен ± рутил ± магнетит + пирит ± кальцит ± доломит ± (кероген) + альбит ± хлориты ± цоизит ± клиноцоизит ± эпидот ± сульфиды ± золото ± серебро (feldspars ± quartz) ± quartz + sericite ± leucoxene ± rutile ± magnetite + pyrite ± calcite ± dolomite ± (kerogene) + albite ± chlorites ± zoisite ± clinozoisite ± epidote ± sulphides ± gold ± silver
Альбитовая Albitic	(кварц) + кварц + серицит + лейкоксен + рутил + магнетит + пирит ± кальцит ± доломит – анкерит ± сидерит ± апатит + сульфиды + золото + серебро ± (кероген) + альбит (quartz) + quartz + sericite + leucoxene + rutile + magnetite + pyrite ± calcite ± dolomite – ankerite ± siderite ± apatite + sulphides + gold + silver ± (kerogene) + albite
Тыловая Rear	(кварц) + кварц + серицит + лейкоксен + рутил + магнетит + пирит ± кальцит ± анкерит ± сидерит ± брейнерит + апатит + сульфиды + золото + серебро (quartz) + quartz + sericite + leucoxene + rutile + magnetite + pyrite ± calcite ± ankerite ± siderite ± breunnerite + apatite + sulphides + gold + silver

Изменения химических составов боковых пород в процессах околоразломного метасоматизма (табл. 5) обусловлены поступлением и фиксацией в них восстановленной серы (в сульфидах), углекислоты (в карбонатах), калия (в сериците), выносом из боковых пород натрия и частично кремния – явлениями, свойственными березитизации, представляющими типовые петрохимические черты этого процесса. Среди петрогенных компонентов наименьшую подвижность в объемах всех изученных метасоматических колонок демонстрирует глинозем

(Al), наибольшую – сера и углекислота, которые достигают, как правило, хлоритовой (эпидотовой), в некоторых колонках [3] фронтальной зон включительно с уменьшением их массы от тыловой зоны. Изменения осуществляются посредством концентрационной диффузии компонентов, механизм которой доказывается изменениями содержания химических элементов в минералах переменного состава в объеме одной (каждой) минералого-петрохимической зоны [2] и перемещением компонентов в колонках из пород с более высокими их концентрациями в породы с более низкими, то есть в направлении выравнивания концентраций [3].

В зонах деформационного воздействия рудо-контролирующих глубинных разломов в разных по минералого-химическим составам, возрасту, происхождению вмещающих разновозрастные месторождения породах, включая толщи черных сланцев, в процессах рудообразования формируются контрастные околорудные аномалии ассоциации фемофильных элементов в составе Ca, Mg, Fe, Ti, P, Mn, содержания которых максимальные, превышающие кларковые на сотни-тысячи процентов в тыловых зонах метасоматических колонок, в направлении фронтальной зоны последовательно, от зоны к зоне, снижаются до кларковых-субкларковых в исходных породах фронтальной зоны.

3. Обсуждение и выводы

Очевидно, в оценке достоверности теоретических положений, раскрывающих условия функционирования в прошлые геологические эпохи обсуждаемых гидротермальных рудообразующих процессов, приоритет принадлежит созданным природой гидротермальным месторождениям. В согласии с объективно обусловленным в данном случае индуктивным способом познания теория призвана объяснять содержание процессов, отвечать на вопрос – что происходит, в частности, при сопровождающем рудообразование метасоматизме, в каких условиях образуются обрамляющие и/или вмещающие рудные тела метасоматические ореолы. Естественно, теория будет жизнеспособна, если она адекватна природным объектам – их составам, внутреннему устройству, то есть достоверно описывает природные процессы и, следовательно, служит средством углубления знаний, расширения сферы их приложения.

В существующей теории метасоматической зональности, созданной на основе законов термодинамики, напротив, приоритет в оценке ее корректности принадлежит теоретическим построениям, которые, в свою очередь, составляют основу следующей из теории модели околоразломной (околожильной) метасоматической зональности. В истории исследования проблемы не осталось печатных следов содержательного анализа автором теории причин несоответствия прогнозируемой им теоретической модели метасоматической зональности с ее мономинеральной тыловой зоной природной и эксперимен-

Таблица 5. Баланс (вынос, привнос, в процентах) петрогенных элементов в зональных околорудных метасоматических ореолах мезотермальных месторождений золота Южной Сибири

Table 5. Balance (carry out, addition, in per cent) of petrogenous elements in zone near-ore metasomatic haloes of mesothermal gold deposits of South Siberia

Минеральные зоны, подзоны Mineral zones and subzones	Химические элементы/Chemical elements													
	Si	Al	K	Na	S*	C _o	Ca	Mg	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Ti	P	Mn	Δ
1. Месторождение Ирокинда/Irokinda deposit														
1.1. Граниты мигматитовой выплавки, AR ₂ (3)/Granites of migmatitic melting AR ₂ (3)														
Фу (5)	0	0	-10	-10	+	20	20	0	0	10	10	50	-60	1,2
Фи (6)	0	0	-10	0	+	220	70	30	30	70	20	110	0	3,1
X (9)	-10	10	-40	40	0	500	70	60	0	60	-10	210	-50	6,9
A (8)	0	0	-20	-10	+	870	10	60	20	50	70	250	10	4,5
T (7)	-10	10	20	-90	+	2400	200	220	100	230	250	650	30	18,8
1.2. Фельзитовые микрогранит-порфиры, PZ ₃ (5)/Felsitic microgranite-porphyrries, PZ ₃ (5)														
X (4)	-10	10	10	0	-60	140	120	180	170	60	280	190	210	12,6
A (6)	-30	10	70	-50	20	300	240	330	330	80	500	310	330	27,0
T (6)	-30	20	160	-90	1900	390	350	390	210	450	520	230	360	36,8
2. Кедровское месторождение/Kedrovskoe deposit														
2.1. Альмандин-двуслюдяные плагиогнейсы, PZ ₃ (1) Almandine-two-mica plagioclase gneisses, PZ ₃ (1)														
Фу (1)	-2	2,8	66	-55	-49	-48	-14	10	44	37	-12	143	-27	7,0
X (1)	-4	8,4	14	-21	160	-27	36	-48	22	35	10	68	-35	6,0
T (1)	-48	-46	27	-96	2140	1330	716	439	65	61	98	653	42	45,0
2.2. Кварцевый диорит, гранодиорит, PZ ₃ (6)/Quartz diorite, granodiorite, PZ ₃ (6)														
X (16)	0	0	0	0	1010	940	0	0	0	-10	0	0	10	4,0
A (6)	-10	-10	20	-10	3170	2070	30	50	60	-30	90	50	40	12,0
T (1)	-50	-20	40	-80	4270	4700	220	240	170	320	170	160	240	41,0
Углеродистые полевошпат-кварцевые сланцы кедровской свиты, R ₃ /Carbonaceous feldspar-quartz slates of kedrovskaya suite, R ₃														
2.3. Метаалевропесчаники (10)/Metaaleuro-sandstones (10)														
A (1)	-17	4,9	248	-34	+	1905	33	1053	282	340	82	300	374	18,0
T (1)	-39	8,8	445	-93	+	6913	880	1781	447	125	73	672	347	43,0
3. Месторождение Чертово Кoryто/Chertovo Koryto deposit														
Углеродистые полевошпат-кварцевые сланцы михайловской свиты, PR ₁ /Carbonaceous feldspar-quartz slates of mikhaylovskaya suite, PR ₁														
3.1. Крупнозернистые метаалевролиты (5)/Big-grain metaaleurolites (5)														
У (2)	0	0	0	-10	-30	-10	50	20	0	30	10	0	0	2,9
X (8)	-20	-30	-30	-70	120	1400	1180	100	70	10	540	840	560	29,7
T (1)	-40	-30	-10	-90	0	2800	1920	170	30	-90	570	900	2110	43,4
3.2. Мелкозернистые метапесчаники (5)/Fine-grain metasandstones (5)														
У (1)	0	0	-30	80	180	40	30	10	0	-20	30	-30	100	3,5
У (3)	0	10	-20	10	130	100	80	120	30	70	20	0	150	6,5
X (6)	-40	0	-20	-70	430	1910	1400	330	160	30	820	890	1750	34,9
T (1)	-30	-10	-10	-90	10	1980	1260	260	110	180	790	870	3620	32,5
3.3. Разнозернистые метапесчаники (3)/Various-grain metasandstones (3)														
У (1)	0	0	70	-70	1130	10	-40	110	60	90	30	-50	0	7,94
X (4)	-30	-10	0	-85	1640	1370	510	420	240	80	840	450	600	31,4
T (1)	-50	-30	-10	-90	6570	3180	1300	690	250	490	490	640	4600	55,6

Примечание. 1) Минеральные зоны и подзоны околорудных метасоматических ореолов: Фу, Фи – подзоны умеренного и интенсивного изменения фронтальной зоны, У, X, A, T – соответственно углеродистая, хлоритовая, альбитовая, тыловая зоны. 2) S* – сера сульфидная, C_o – углерод окисленный (карбонатный), + – привнос S при содержании ее в исходной породе ниже предела чувствительности анализа. 3) В скобках – число проб, участвующих в расчете средних. 4) Δ – удельная масса перемещенного (привнесенного и вынесенного) вещества в процентах к массе вещества исходных пород в стандартном геометрическом объеме 10000 Å³. 5) Полные химические силикатные анализы горных пород выполнены в Центральной лаборатории ПГО «ЗапСибгеология» и в Западно-Сибирском испытательном центре (г. Новокузнецк) под руководством И.А. Дубровской и Г.Н. Юминовой.

Note. 1) Mineral zones and subzones of near-ore metasomatic haloes: Фу, Фи are the subzones of moderate and intensive alteration of frontal zone; У, X, A, T are the carbonaceous, chloritic, albitic and rear zones. 2) S* is the sulfide sulphur, C_o is the carbon oxidized, H⁺ is the hydrogen of water H₂O⁺. 3) The number of samples involved in calculation of the average is in brackets. 4) Δ is the specific weight of the removed (added and carried out) substance in relation in per cent to the weight of the initial rocks substance in standard geometric measurement 10000 Å³. 5) Complete chemical analysis of rocks was fulfilled in the Central laboratory of «ZapSibgeologiya» and in West-Siberian Test Center (Novokusnetsk) by I. Dubrovskaya and G. Yuminova.

тальной модели с их полиминеральной тыловой зоной при том, что возможности для выявления этого несоответствия были. Достаточно было выполнить балансовые расчеты межзональной миграции компонентов в природных метасоматических колонках, подобных приведенным в табл. 5, и теория была бы другой. В этом эпизоде видно одно из негативных проявлений человеческого фактора.

В приведенных материалах присутствуют все составляющие процедуры познания – идея, трансформированная в рабочую гипотезу и затем в теорию с созданием теоретической модели метасоматической зональности, в том числе в околоразломном (околожильном) варианте, результаты экспериментов по ее моделированию с получением экспериментальных метасоматических колонок, результаты изучения природных метасоматических колонок. Это обеспечивает возможность сравнительного анализа всех составляющих на предмет оценки корректности теории.

Концентрированное выражение теории метасоматической зональности Д.С. Коржинского – теоретическая модель ее обладает чертами сходства и различий с экспериментальными и околоразломной (околожильной) типовой природной аутентичной по минералого-петрохимическим чертам и порядку зональности во всех, включая черные сланцы, породах, метасоматическими колонками.

Сходство заключается в следующем:

- все колонки обладают минералого-петрохимической зональностью;
- предписанные теорией изменения минеральных составов пород в природных колонках в направлении от фронтальной зоны к тыловой, выражающиеся в последовательном, от зоны к зоне, замещении минералов исходных пород (пироксенов, амфиболов, биотита, полевых шпатов и других) и некоторых образованных в процессах метасоматизма (актинолита, тремолита, эпидота, хлоритов, альбита);
- смена в экспериментальных и природных метасоматических колонках минеральных ассоциаций березитового профиля в составе кварца, серицита, Mg-Fe карбонатов, альбита, сульфидов, образованных в тыловой и промежуточных зонах, минеральными ассоциациями пропиловитового профиля в составе актинолита-тремолита, эпидота, хлоритов, карбонатов, альбита – в периферийных зонах;
- слабо выраженная межзональная миграция компонентов во фронтальной и промежуточных зонах метасоматических колонок, усиливающаяся в тыловых зонах;
- привнос в метасоматические колонки калия, углекислоты, серы, вынос из них натрия, кремния – типовые петрохимические черты процесса образования березитов.

Отличия теоретической модели метасоматической зональности от экспериментальных и природных метасоматических колонок заключаются в следующем:

- декларируемое в теории уменьшение числа минеральных фаз на единицу в каждой более тыловой зоне «вплоть до мономинеральности» осевой зоны – кварцевой жилы – в экспериментах и природных процессах не достигается – кварцевые рудные жилы в природных колонках сложены агрегатом кварца, карбонатов, рудных минералов (иначе жильных рудных месторождений не существовало бы), а смежная с ней тыловая зона – березитом в составе кварца, серицита, анкерита, пирита, рутила. Напротив, теория, как отмечалось, отводит место березитам в приведенном стандартном составе в одной из промежуточных между фронтальной и тыловой зон [1]. При всем этом приходится констатировать, что следующая из теории модель минеральной зональности с мономинеральной тыловой зоной рассматривается некоторыми авторами как эталонная [10–12], с которой следует сравнивать природные колонки. Мономинеральность осевой зоны природных колонок достигается в редких случаях, например в случае воздействия на толщи кварцитов растворяющих кварц горячих щелочных растворов, не содержащих, кроме щелочей, соединений металлов, в результате которого вследствие обогащения кремневой кислотой и трансформации по этой причине растворов в кислотные образованы в промышленных масштабах хрусталеносные мономинеральные кварцевые жилы, в частности, – на Алдане, Полярном Урале, в Бразилии;
- предусмотренный в теории вынос из тыловой зоны системы околоразломного (околожильного) метасоматизма всех, кроме образующих ее, компонентов опровергается результатами балансовых расчетов их межзональной миграции в природных метасоматических колонках (табл. 5). Как отмечалось, устойчиво из тыловых зон системы удаляется почти полностью натрий, вытесняемый более сильным основанием калием, и частично (до 50 мас. % от исходного содержания) – кремний, используемый природой для строительства кварцевых жил и освобождения места в тыловых зонах для поступающих из трещинных растворов компонентов. Часть компонентов перераспределяется внутри зон и между зонами, диффундируя из областей более высоких концентраций в области более низких [3, 9]. Вопреки теории, значительная часть компонентов, в том числе фемфильных в обрамлении глубинных разломов, поступает в систему «порода – поровый раствор – трещинный раствор» из трещинных растворов. Компоненты, обладающие разной подвижностью, в том числе диффундирующие с разной скоростью, в основном обогащают тыловые зоны, но проникают в хлоритовую (так называемые в теории «инертные при всех условиях» Ti и P) и даже во фронтальную (K, CO₂, S, Fe, Ti, P) зоны. Последнее связывает пропиловитовую и бе-

резитовую составляющие околорудных метасоматических колонок, в том числе в черных сланцах, в единое гармонично устроенное целое как образованное в результате единого аллохимического процесса, инициированного горячими растворами, генерированными, судя по совокупности данных [9], в мантийных очагах умеренно щелочных базальтовых расплавов.

Приведенные факты участия в полном объеме метасоматических колонок в составе гидротермальных минеральных новообразований не только наиболее подвижных S, CO₂, но и фемофильных металлов, поступающих извне ареалов гидротермальных аллохимических изменений земной коры, формируют приоритет представления о принадлежности метасоматических ореолов-колонок к пропилитовой и березитовой метасоматическим формациям, сочетающимся в их (ореолов) объемах, а не к производным регионального метаморфизма гидратации, с которыми многие геологи в разных регионах связывают рудообразование – на Северо-Востоке России [13, 14], в Кодаро-Удоканской и Таллаи-Каралонской структурно-формационных зонах Северного Забайкалья [15], Тыйско-Олокитском метаморфическом поясе Северного Прибайкалья [16], в Ленском районе [17], в Северном Китае [18], Западной Австралии [19], в орогенных районах мира [20].

Как известно, в теории и в природном метасоматическом процессе формирования метасоматической зональности заложен основополагающий сформулированный Д.С. Коржинским принцип дифференциальной подвижности компонентов, определяемой их свойствами, термодинамическими и физико-химическими режимами среды порообразования. Вместе с тем констатация того факта, что между теоретической моделью околоразломной метасоматической зональности и приоритетной для установления истины типовой природной околоразломной (околоразломной) метасоматической колонкой мало общего, требует выяснения причин этого несоответствия, чтобы понять, почему первая не согласуется со второй и какие выводы могут последовать из этого понимания для коррекции теории.

Первая причина заключается в том, что при поступлении в разломы инициирующих метасоматизм горячих растворов в гидравлически связанных системах «порода – поровый раствор – трещинный раствор» происходит встречная концентрационная диффузия компонентов, обусловленная возникновением градиентов концентраций компонентов, часть которых при растворении минералов переходит из инертного состояния в подвижное (в раствор) и мигрирует в области пониженных содержания формирующихся метасоматических колонок, в том числе в трещинные растворы (Si, Na). Другие компоненты поступают с трещинными растворами извне (K, CO₂, S), диффундируют в поровые растворы, входят в составы образующихся минералов, то есть переходят в

инертное состояние. Все это можно видеть в результатах балансовых расчетов миграции петрогенных компонентов в сочетании с минеральными составами метасоматических пород (табл. 4, 5) [3, 9].

Те компоненты, которые не отличаются высокой подвижностью и диффундируют из трещинных растворов в поровые медленно, прежде всего фемофильные, как правило, образуют контрастные аномалии в тыловой и смежной с ней зонах (табл. 5). Вместе с тем преобладание числа диффундирующих в метасоматические колонки в разных сочетаниях компонентов (K, S, CO₂, Ca, Mg, Fe, P, Ti, Mn) над числом удаляющихся из них (Na, Si) означает, что в процессах формирования околоразломной метасоматической зональности закон концентрационной диффузии, действующий при возникновении градиентов концентраций компонентов в гидравлически связанных системах «порода – трещинный раствор – поровый раствор», приоритетнее законов термодинамики, регламентирующих, согласно теории, вынос из тыловых зон почти всех компонентов, кроме тех двух (Si, O), которые должны образовать тыловую (осевую) мономинеральную зону – кварцевую жилу. В реальных условиях образование мономинеральной зоны в тылу околоразломных (околожилных) метасоматических колонок в рудных месторождениях невозможно.

Вторая причина заключается в том, что при доказанном С.С. Смирновым еще в 40-х годах прошлого столетия [9] пульсационном (порционном) режиме функционирования гидротермальных рудообразующих процессов теория метасоматической зональности разрабатывалась, однако, для эволюционного режима, предполагающего непрерывное истечение металлоносных растворов из источников их генерации.

По современным данным [9] порционный режим поступления металлоносных растворов в области рудообразования доказывается независимыми фактами: 1) чередующимся во времени внедрением силикатных расплавов и металлоносных растворов подобно тому, как в областях вулканической деятельности истечение вулканических газов – надкритических металлоносных флюидов – чередуется с излияниями, выбросами силикатных расплавов; 2) повторяющейся в составе каждого рудно-минерального комплекса последовательностью отложения кварца, сульфидов, карбонатов; 3) повторяющимся возрастанием температур отложения ранних зарождений кварца в составе каждого рудно-минерального комплекса над температурами отложения поздних зарождений кварца каждого предшествующего рудно-минерального комплекса.

Вероятно, порционный режим поступления металлоносных растворов вносит наибольшие осложнения в процесс формирования околоразломной (околоразломной) метасоматической зональности, чрезвычайно трудно поддающийся моделирова-

нию вследствие, в частности, изменений составов и концентраций растворенных компонентов, включая те, которые влияют на физико-химическое состояние растворов последовательно сменяющихся порций, и/или изменений путей миграции последних в процессе формирования разломной структуры месторождений.

Из приведенных результатов анализа теории околоразломной метасоматической зональности Д.С. Коржинского следует очевидная необходимость коррекции ее на предмет приведения новой концепции в соответствие с природными процессами. В последние годы это стало возможным потому, что знания о последних значительно углублены и расширены сравнительно со временем создания теории и многие ранее дискуссионные положения получили статус достоверного знания или отвергнуты, а возможности принятия верных решений возросли.

Вместе с тем приходится констатировать, что несостоятельность некоторых упомянутых выше считавшихся важными для развития и углубления теории положений была известна и в годы разработки теории, но они (положения) были учтены в теории и законсервированы в ней до сих пор. В этом и других подобных фактах видно негативное влияние человеческого фактора, тормозящего развитие теории на многие годы.

В коррекции представлений об условиях возникновения в процессах гидротермального рудообразования околоразломной (околожильной) метасоматической зональности и в создании адекватной природным процессам альтернативной существующей теории концепции формирования околоразломной метасоматической зональности учитываются следующие определяющие ее или влияющие на нее действующие одновременно или последовательно факты:

- факт, определяющий застойный режим трещинных (в отличие от теории) и поровых гидравлически связанных растворов в околоразломных породно-флюидных системах;
- факт, определяющий в согласии с теорией Д.С. Коржинского переход в растворенное, то есть подвижное, состояние в конкретных термодинамических и физико-химических условиях высвобождающихся при замещении, растворении минералов компонентов и диффузию их в соответствии с градиентами концентраций каждого из них, обуславливающую, согласно результатам балансовых расчетов межзональной миграции компонентов, но вопреки теории, преимущественно перераспределение их внутри метасоматических колонок и устойчивую миграцию из них всего лишь двух компо-

- используемый в теории факт дифференциальной подвижности компонентов, определяющей большую или меньшую подвижность – инертность каждого компонента в конкретных сочетаниях термодинамических и физико-химических меняющихся во времени и пространстве (от одной порции растворов и минеральной зоны к той и другой) условий минералообразования, наиболее сложный для разработки в процедуре реконструкции процессов;
- факт, определяющий, вопреки теории, диффузию в поровые растворы на большие или меньшие расстояния от раствороподводящих разломов большинства компонентов, диффундирующих с большей или меньшей скоростью из поступавших в систему трещинных растворов в соответствии со свойствами и градиентами концентраций каждого из них;
- факт порционного, вопреки теории, поступления в формирующиеся метасоматические колонки металлоносных растворов, как следствие, – пространственного усложняющего структуру метасоматической зональности смещения в разных сочетаниях минеральных ассоциаций – производных сменяющихся во времени порций металлоносных растворов, образующих, как отмечалось, в сочетании с поровыми растворами вмещающих пород гидравлически связанные системы.

4. Заключение

Существующая теория околоразломной (околожильной) метасоматической зональности не описывает условия ее формирования в сопровождающих руды повторяющихся во множестве мезотермальных месторождений золота (и других металлов) метасоматических колонках пропилит-брезитовой формаций, но прогнозирует эти условия, как если бы результаты изучения созданных природой метасоматических колонок было невозможно получить. Негативный результат прогноза обсуждается в приведенных материалах – он есть следствие того, что не все условия – факторы, определяющие образование метасоматической зональности или влияющие на нее, заложены в теории. Представляется также завышенным приоритет законов термодинамики над другими, в частности концентрационной диффузии, определяющими направление, в том числе встречное, скорости миграции компонентов и другие процессы околоразломного метасоматизма.

Очевидна необходимость углубления теории метасоматической зональности как составной части теории эндогенных пороудо-рудообразующих процессов, в которой были бы учтены факты и полученные результаты, адекватные природным процессам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коржинский Д.С. Очерк метасоматических процессов // Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях / под ред. акад. А.Г. Бетехтина, доктора геол.-минер. наук Г.А. Соколова. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – С. 335–456.
2. Коржинский Д.С. Теория метасоматической зональности. – М.: Наука, 1982. – 104 с.
3. Кучеренко И.В. Гидродинамика трещинно-поровых флюидно-породных взаимодействий и механизм массопереноса в процессах околотрещинного гидротермального метасоматизма // Разведка и охрана недр. – 2010. – № 11. – С. 37–43.
4. Зарайский Г.П., Шаповалов Ю.Б. Экспериментальное исследование физико-химических условий березитизации // Доклады АН СССР. – 1978. – Т. 238. – № 1. – С. 207–210.
5. Экспериментальное исследование зональности и условий формирования рудоносных метасоматитов стадии кислотного выщелачивания / Г.П. Зарайский, Ю.Б. Шаповалов, В.Н. Балашов, Ф.М. Стояновская, Е.В. Рядчикова, К.В. Мартынов // Эксперимент в решении актуальных задач геологии. – М.: Наука, 1986. – С. 250–276.
6. Зарайский Г.П. Зональность и условия образования метасоматических пород. – М.: Наука, 1989. – 344 с.
7. Kucherenko I.V., Zhang Yuxuan, Abramova R. Mineral-petrochemical wallrock alteration of rocks in Bericul gold-ore deposit (Kuznetsk Alatau) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 27. Article number 012006. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012024> (дата обращения 03.05.2017).
8. Kucherenko I., Cherkasova T., Abramova R. Rear polymineral zone of near-veined metasomatic aureole in mesothermal Zun-Holba gold deposit (Eastern Sayan) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 27. Article number 012003. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/> (дата обращения 03.05.2017).
9. Кучеренко И.В., Гаврилов Р.Ю., Синкина Е.А. Золоторудное месторождение Чертово Кoryто: геология, рудно-минеральные комплексы, генезис. – Saarbrücken: Palmarium academic publishing, 2016. – 365 с.
10. Метасоматизм и метасоматические породы / В.А. Жариков, В.Л. Русинов, А.А. Маракушев, Г.П. Зарайский, Б.И. Омеляненко, Н.Н. Перцев, И.Т. Росс, О.В. Андреева, С.С. Абрамов, К.В. Подлесский. – М.: Научный мир, 1998. – 492 с.
11. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе / В.Л. Русинов, О.В. Русинова, С.Г. Кражев, Ю.В. Щегольков, Э.И. Алышев, С.Е. Борисовский // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50. – № 1. – С. 3–46.
12. Рудно-метасоматическая и геохимическая зональность золото-рудных полей и месторождений складчатых поясов Сибири / А.Ф. Коробейников, Ю.С. Ананьев, А.И. Гусев, В.Г. Ворошилов, Г.Г. Номоконова, А.Я. Пшеничкин, Т.В. Тимкин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 458 с.
13. The Noble Metal Distribution in the Black Shales of the Degdekan Gold Deposit in Northeast Russia / A.I. Khanchuk, L.P. Plusnina, E.M. Nikitenko et al. // Russian journal of Pacific Geology. – 2011. – V. 5. – № 2. – P. 89–96.
14. Volkov A.V., Murashov K.Y., Sidorov A.A. Geochemical peculiarities of ores from the largest Natalka gold deposit in Northeastern Russia // Doklady Earth Sciences. – 2016. – V. 466. – № 2. – P. 161–164.
15. Abramov B.N. The formation of black shale gold deposits in the southern environs of the Siberian Platform (Kodaro-Udokanskaya and Tallai-Karalonskaya zones) // Doklady Earth Sciences. – 2013. – V. 449. – № 2. – P. 371–374.
16. Сизых А.И., Юденко М.А. Метаморфизм и метаморфогенное рудообразование Тыйско-Олокинского метаморфического пояса Северного Прибайкалья // Геология и полезные ископаемые Восточной Сибири / под ред. А.И. Сизых. – Иркутск: Изд-во Иркутского гос. ун-та, 2013. – С. 68–78.
17. Gold mineralization and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits / M.A. Yudovskaya, V.V. Distler, V.Yu. Prokofiev, N.N. Akinfiev // Geoscience Frontiers. – 2015. DOI: 10.1016/j.gsf.2015.07.010.
18. Gold mineralization in Proterozoic black shales: example from the Haoyaerhudong gold deposit, northern margin of the North China Craton / Wang Jianping, Liu Jiagun, Peno Runmin, Liu Zhenjiang, Zhao Baisheng, Li Zan, Wang Yufeng, Lui Chonghao // Ore Geology Reviews. – 2014. – V. 63. – P. 150–159.
19. Synsedimentary to early diagenetic gold in black shale-hosted pyrite nodules at the Golden Mile Deposit, Kalgoorlie, Western Australia / J.A. Steadman, R.R. Large, S. Meffre, P.H. Olin, L.V. Danyushevsky, D.D. Gregory, I. Belousov, E. Lounejeva, T.R. Ireland, P. Holden // Economic Geology. – 2015. – V. 110. – № 5. – P. 1157–1191.
20. Groves D.I., Santosh M. The giant Jiaodong gold province: the key to a unified model for orogenic gold deposits? // Geoscience Frontiers. – 2016. – № 7. – P. 409–417.

Поступила 25.05.2017 г.

Информация об авторах

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

UDC 553.242.4:167–047.58

ORE GEOLOGY PROBLEMS AND THE HUMAN FACTOR. PART 1. MINERAL-PETROCHEMIC ZONING OF THE NEAR-VEINS METASOMATIC AUREOLES IN THE MESOTHERMAL GOLD DEPOSITS: THEORY, EXPERIMENT, NATURE

Igor V. Kucherenko,
kivr@tpu.ru

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

The relevance of the research. In reconstruction of gold, coloured metals, uranium deposits formation there are the problems which have not been solved up to now. The evident necessity in correct solutions of these problems for deepening – developing – hydrothermal ore-formation theory and improving the forecast-prospecting criteria mineralization complexes encourages the search and elimination of objective and possible subjective reasons leading to endless discussions justified before by shortage of data but which became more intelligible as much as new knowledge accumulation.

The main aim of the research. To develop the discrepancies reasons identical to the natural processes of their reconstruction and elimination of the reasons, estimated by the author as subjective ones, the author suggests and discusses the known before and authors' solutions of the following key debatable ore geology problems: 1) problem of near-ore metasomatic zoning formation in its near-vein (near-fracture) version; 2) problem of gold sources concentrated in ores among crystalline substratum and black shales; 3) problem of formation of mesothermal gold deposits leading to magmatism and metamorphism; 4) problem of formational typization of hard useful mineral deposits as means of realization of the objective priority inductive method of ore-formation understanding in combining with the deductive one.

The methods of the research. To solve each problem the author: 1) analyzed the existing ideas for appraisal of their conformity to contemporary data; 2) introduces the author's materials, suggested for substantiation of the problems correct solutions, and they are discussed.

The results of the research. In solution of the first problem by means of the results analyses of mineral-petrochemical study of the beresite metasomatic formation zone columns, formed in plutonic and volcanic, metamorphic, sedimentary, including black shales, rocks in nineteen gold mesothermal deposits of Siberian craton south mountain-folded frame and other regions it is explained the non-conformity of the following from the D.S. Korzhinsky metasomatic zoning theory model to natural metasomatic columns – the monomineral rear zone prescribed by the theory is not formed. In rear zone the mineral number is comparable with mineral number in other zones, including that in initial rocks. Polymineral composition of the rear zone of the metasomatic columns is caused by migration of the petrogenous components, proved by balance calculations, – their counter diffusion from fracture solutions to pore solutions of side rocks and from pore solutions to fracture solutions as well as by portioning mode of the injection of metal-bearing fluids into blocks of rock-ore-formation. Negative effect of the human factor is expressed in the following. In the metasomatic zoning theory in its near-vein version, developed on the base of the thermodynamics laws, **the other mentioned known in years of the theory creation natural factors – counter diffusion components in fracture – rock systems and pulsational** (but non evolutionary according to the theory) mode of functioning of ore-forming processes were not taken into account. As a result theoretical and natural near-vein (fracture) metasomatic columns were not compared. It is necessary to develop near-vein metasomatic zoning theory adequate in all natural processes causing near-ore endogenous metasomatic zoning.

Key words:

Mesothermal gold deposits, theoretical, experimental, natural models of the near-vein metasomatic beresite formation columns, natural and human factors.

REFERENCES

1. Korzhinsky D.S. Oчерk metasomaticheskikh processov [Study of metasomatic processes]. *Osnovnye problemy v uchenii o magmatogennykh rudnykh mestorozhdeniyakh* [The key issues in study of magmatogenic ore fields]. Ed. by A.G. Betekhtin, G.A. Sokolov. Moscow, AS USSR Press, 1955. pp. 335–456.
2. Korzhinsky D.S. *Teoriya metasomaticheskoy zonalnosti* [Theory of metasomatic zoning]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 104 p.
3. Kucherenko I.V. Hydrodynamics of the fracture-pore fluid-rock interactions and mass transfer mechanism in the adjacent-fracture hydrothermal metasomatic processes. *Prospect and protection of mineral resources*, 2010, no. 11, pp. 37–43.
4. Zaraysky G.P., Shapovalov Yu.B. Eksperimentalnoe issledovanie fiziko-khimicheskikh usloviy berezhitizatsii [Experimental research of physical and chemical conditions of beresitization]. *Doklady AN SSSR*, 1978, vol. 238, no. 1, pp. 207–210.
5. Zaraysky G.P., Shapovalov Yu.B., Balashov V.N., Stoyanovskaya F.M., Ryadchikova E.V., Martynov K.V. Eksperimentalnoe issledovanie zonalnosti i usloviy formirovaniya rudonosnykh metasomatitov stadii kislotnogo vyshchelachivaniya [Experimental research of zoning and conditions of forming ore-bearing metasomatites of acid leaching stage]. *Eksperiment v reshenii aktualnykh zadach geologii* [Experiment when solving the current tasks of geology]. Moscow, Nauka Publ., 1986. pp. 250–276.
6. Zaraysky G.P. *Zonalnost i usloviya obrazovaniya metasomaticheskikh porod* [Zoning and conditions of metasomatic rock formation]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 344 p.
7. Kucherenko I.V., Zhang Yuxuan, Abramova R. Mineral-petrochemical wallrock alteration of rocks in Bericul gold-ore deposit (Kuznetsk Alatau). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27. Article number 012006. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012024> (accessed 03 May 2017).
8. Kucherenko I., Cherkasova T., Abramova R. Rear polymineral zone of near-veined metasomatic aureole in mesothermal Zun-Holba gold deposit (Eastern Sayan). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27. Article number 012003. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/> (accessed 03 May 2017).

9. Kucherenko I.V., Gavrillov R.Yu., Sinkina E.A. *Zolotorudnoe mestorozhdenie Chertovo Koryto: geologiya, rudno-mineralnye komplekxy, genezis* [Gold ore field Chertovo Koryto: geology, ore-mineral complexes, genesis]. Saarbrücken, Palmarium academic publishing, 2016. 365 p.
10. Zharikov V.A., Rusinov V.L., Marakushev A.A., Zaraysky G.P., Omelyanenko B.I., Pertsev N.N., Ross I.T., Andreeva O.V., Abramov S.S., Podlessky K.V. *Metasomatizm i metasomaticheskie porody* [Metasomatism and metasomatic rocks]. Moscow, Nauchny mir Publ., 1998. 492 p.
11. Rusinov V.L., Rusinova O.V., Kryazhev S.G., Shchegolkov Yu.V., Alyshev E.I., Borisovsky S.E. Okolorudny metasomatizm terrigennykh uglerodistykh porod v Lenskom zolotorudnom rayone [Wallrock metasomatism of terrigenous carbonic rocks in Lensky gold ore area]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeny*, 2008, vol. 50, no. 1, pp. 3–46.
12. Korobeynikov A.F., Ananov Yu.S., Gusev A.I., Voroshilov V.G., Nomokonova G.G., Pshenichkin A.Ya., Timkin T.V. *Rudno-metasomaticheskaya i geokhimicheskaya zonalnost zolotorudnykh poley i mestorozhdeny skladchatykh poyasov Sibiri* [Ore-metasomatic and geochemical zoning of gold ore fields and deposits of folded zones in Siberia]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2013. 458 p.
13. Khanchuk A.I., Plyusnina L.P., Nikitenko E.M. The Noble Metal Distribution in the Black Shales of the Degdekan Gold Deposit in Northeast Russia. *Russian journal of Pacific Geology*, 2011, vol. 5, no. 2, pp. 89–96.
14. Volkov A.V., Murashov K.Y., Sidorov A.A. Geochemical peculiarities of ores from the largest Natalka gold deposit in Northeastern Russia. *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 466, no. 2, pp. 161–164.
15. Abramov B.N. The formation of black shale gold deposits in the southern environs of the Siberian Platform (Kodaro-Udokanskaya and Tallai-Karalonskaya zones). *Doklady Earth Sciences*, 2013, vol. 449, no. 2, pp. 371–374.
16. Sizykh A.I., Yudenko M.A. Metamorfizm i metamorfogennoe ru-dobrazovanie Tyysko-Olokitskogo metamorficheskogo poyasa Severnogo Pribaykalya [Metamorphism and metamorphogenetic mineralization of Tysk-Olokitsky metamorphic zone of Northern Baikal]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Vostochnoy Sibiri* [Geology and natural resources of Eastern Siberia]. Ed by. A.I. Sizykh. Irkutsk, Irkutsk State University Press, 2013. pp. 68–78.
17. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Yu., Akinfiyev N.N. Gold mineralization and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits. *Geoscience Frontiers*, 2015. DOI: 10.1016/j.gsf.2015.07.010.
18. Wang Jianping, Liu Jiagun, Peno Runmin, Liu Zhenjiang, Zhao Baisheng, Li Zan, Wang Yufeng, Lui Chonghao. Gold mineralization in Proterozoic black shales: example from the Haoyaoerhudong gold deposit, northern margin of the North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 2014, vol. 63, pp. 150–159.
19. Steadman J.A., Large R.R., Meffre S., Olin P.H., Danyushevsky L.V., Gregory D.D., Belousov I., Lounejeva E., Ireland T.R., Holden P. Synsedimentary to early diagenetic gold in black shale-hosted pyrite nodules at the Golden Mile Deposit, Kalgoorlie, Western Australia. *Economic Geology*, 2015, vol. 110, no. 5, pp. 1157–1191.
20. Groves D.I., Santosh M. The giant Jiaodong gold province: the key to a unified model for orogenic gold deposits? *Geoscience Frontiers*, 2016, no. 7, pp. 409–417.

Received: 25 May 2017.

Information about the authors

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

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректурa и перевод на английский язык *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати хх.07.2017. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 13,96. Уч.-изд. л. 12,64.
Заказ хх-17. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ