

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 328, № 9, 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)
Кирыянова 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, № 9, 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

CONTENTS

- Фазовые переходы кремнезема в опал-кристобалитовых породах как фактор качества кремнистого сырья** 6
Смирнов П.В.
- Геоинформационные системы предприятий нефтегазовой отрасли: функциональность, архитектура и перспективы развития** 16
Марков Н.Г.
- Влияние формы меридионального контура рабочего колеса на параметры потока газа в радиально-осевой турбине газотурбинной установки** 33
Пассар А.В.
- Выглубление каналов тепловых сетей – ключ к их эффективной эксплуатации** 49
Чичерин С.В.
- Метаморфизм и тектоника: роль в структурно-вещественном преобразовании хромшпинелидов из ультрамафитов** 57
Юричев А.Н.
- Минералого-геохимический состав зольного остатка организма человека г. Норильска как возможный индикатор элементного состава среды обитания** 67
Рихванов Л.П., Дериглазова М.А., Барановская Н.В.
- Определение напряжений и остаточного ресурса по показаниям датчика деформаций интегрального типа переменной чувствительности** 82
Сызранцев В.Н., Сызранцева К.В.
- Получение буровых реагентов модификацией нейтрально-сульфитных щелоков фосфоновыми соединениями** 94
Тептерева Г.А., Конесев Г.В., Исмаков Р.А., Кантор Е.А., Дихтырь Т.Д.
- Минералого-геохимические особенности донных отложений малых рек в междуречье рек Ло и Кау (Северный Вьетнам)** 102
Савичев О.Г., Домаренко В.А., Перегудина Е.В., Нгуен Ван Луен, Шалдыбин М.В., Канаки А.В.
- Околорудные метасоматиты барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района (Рудный Алтай)** 114
Бестемьянова К.В., Гринева О.М.
- Состояние и перспективы использования рекреационно-оздоровительной зоны «Ключи» (Томская область)** 127
Семенова Н.М., Назаров А.Д., Лойко С.В., Сидорина Н.Г., Тишин П.А.
- Silica phase transitions in opal-cristobalite rocks as a factor of quality of siliceous raw material** 6
Smirnov P.V.
- Geoinformation systems for oil and gas enterprises: functionality, architecture and development prospects** 16
Markov N.G.
- Influence of a meridian contour form in a driving wheel on gas flow parameters in a radially-axial turbine of a gas-turbine plant** 33
Passar A.V.
- Unlocking a potential of district heating network efficient operation and maintenance by minimizing the depth of a trench system** 49
Chicherin S.V.
- Metamorphism and tectonics: the role in structurally-compositional transformation of chromspinelides from ultramafites** 57
Yurichev A.N.
- Mineral and geochemical composition of human body ash residue of Norilsk residents as a possible indicator of elemental composition of the environment** 67
Rikhvanov L.P., Deriglazova M.A., Baranovskaya N.V.
- Determination of stresses and residual life in accordance with indications of variable-sensitivity integral strain gauge** 82
Syzrantsev V.N., Syzrantseva K.V.
- Obtaining drill reagents by modification of neutral-sulphite alkali phosphonic compounds** 94
Teptereva G.A., Konesev G.V., Ismakov R.A., Kantor E.A., Dikhtyar T.D.
- Mineral-geochemical features of the minor river sediments in the interfluvial area of the Lo and Kau rivers (Northern Vietnam)** 102
Savichev O.G., Domarenko V.A., Peregudina E.V., Nguyen Van Luyen, Shaldybin M.V., Kanaki A.V.
- Wallrock metasomatites of barite-polymetallic deposits of Zmeinogorsk ore district (Rudny Altai)** 114
Bestemianova K.V., Grineva O.M.
- Status and prospects of using the health improvement area «Klyuchi» (Tomsk region)** 127
Semenova N.M., Nazarov A.D., Loyko S.V., Sidorina N.G., Tishin P.A.

УДК 552.581; 552.144; 553.69; 553.578

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ КРЕМНЕЗЕМА В ОПАЛ-КРИСТОБАЛИТОВЫХ ПОРОДАХ КАК ФАКТОР КАЧЕСТВА КРЕМНИСТОГО СЫРЬЯ

Смирнов Павел Витальевич^{1,2},
geolog.08@mail.ru

¹ Тюменский индустриальный университет,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

² Институт Геологии и Палеонтологии Технического университета Клаусталь,
Германия, 38678, Clausthal-Zellerfeld, Adolph-Roemer-Strasse, 2A.

Актуальность. В диатомитах и диатомовых глинах по мере диагенетических преобразований происходит нарушение или частичная утрата биоморфной структуры, которая обуславливает уникальные свойства диатомитов как сырья для производства фильтровальных и сорбционно-активных материалов. Трансформация структуры сопровождается и изменением вещественного состава за счет полиморфных переходов диоксида кремния – опал-А в опал-СТ, а по мере более глубоких преобразований – далее в кристобалит, тридимит. Изменения структуры и минерального состава неуклонно влекут за собой перемены промышленно значимых свойств опал-кristобалитовых пород: плотности, пористости, удельной поверхности, механической прочности и т. д. К настоящему времени в российской научной литературе мало представлены данные о том, что технологические свойства и качество кремнистого сырья контролируются степенью диагенетических преобразований, равно как не показана эта связь на примере конкретных объектов минерально-сырьевой базы.

Цель работы: анализ влияния степени диагенетических преобразований и фазовых переходов опал-А в опал-СТ в опал-кristобалитовых породах на промышленно значимые свойства: пористость, плотность, удельную поверхность.

Методы исследований: полевые исследования, рентгенофлуоресцентный анализ, сканирующая электронная микроскопия, определение пористости, плотности, величины удельной поверхности (методом БЭТ).

Результаты. Впервые для опал-кristобалитовых пород Зауралья и севера Западной Сибири показана связь между промышленно значимыми свойствами, химическим составом и фазовыми переходами кремнезема. В результате проведенных исследований можно констатировать, что при сравнении пород, находящихся на различных стадиях диагенеза, устанавливаются существенные различия в содержании кремнезема и полторных оксидов. По мере диагенетических преобразований фиксируется увеличение содержания кремнезема, и вместе с тем повышение плотности, уменьшение пористости и изменение удельной поверхности. По данным сканирующей электронной микроскопии принята классификация изученных опал-кristобалитовых пород на четыре группы.

Ключевые слова:

Диатомит, трепел, опока, кремнезем, опал-А, опал-СТ, диагенез, Зауралье, Западная Сибирь.

Введение

В краевых западной, северной и юго-западной частях Западной Сибири повсеместно выходят на поверхность палеоцен-эоценовые опал-кristобалитовые породы – диатомиты, опоки, трепелы и их глинистые разности, образуя промышленно значимые залежи этого сырья. Особенности формирования опал-кristобалитовых пород в Зауралье предопределили ситуацию, когда приповерхностное залегание имеют кремнистые отложения как разного возраста [1], так и находящиеся на различных стадиях литификации – от подстадий позднего диагенеза до раннего протокатагенеза [2].

В диатомитах по мере диагенетических преобразований происходит растворение панцирей кремнистых организмов и, соответственно, нарушение или частичная утрата биоморфной структуры, которая обуславливает уникальные свойства диатомитов как сырья для производства фильтровальных и сорбционно-активных материалов. Трансформация структуры сопровождается и изменением вещественного состава за счет последовательных реакций растворения–осаждения–перекристаллизации и полиморфных переходов кремнезема – опал-А в опал-СТ (опал-кristобалит-тридимит), а по мере более глубоких преобра-

зований – в кристобалит, тридимит, кварц [3, 4]. Изменения структуры и минерального состава неуклонно влекут за собой перемены промышленно значимых свойств диатомитов: плотности, пористости, удельной поверхности, механической прочности и т. д. [5–11].

Зарубежные научные работы по данной теме основное внимание уделяют анализу геологических факторов, определяющих трансформацию опал-А в опал-СТ: первоначальной глубины залегания, температуры, времени постседиментационных изменений, литологии вмещающих пород, химии поровых вод, удельной площади поверхности частиц опал-А, проницаемости осадка и др. [12–18]. Обусловленность технологических свойств и качества кремнистого сырья степенью литификации, как в англоязычной, так русскоязычной литературе, на примере конкретных объектов минеральной базы рассмотрена ограниченно.

Объекты и методы исследований

Для проведения лабораторных исследований отбирались пробы диатомитов, опок и трепелов из карьеров и естественных обнажений Зауралья и севера Западной Сибири. Всего исследованы породы с 7 месторождений и естественных разрезов (рис. 1).

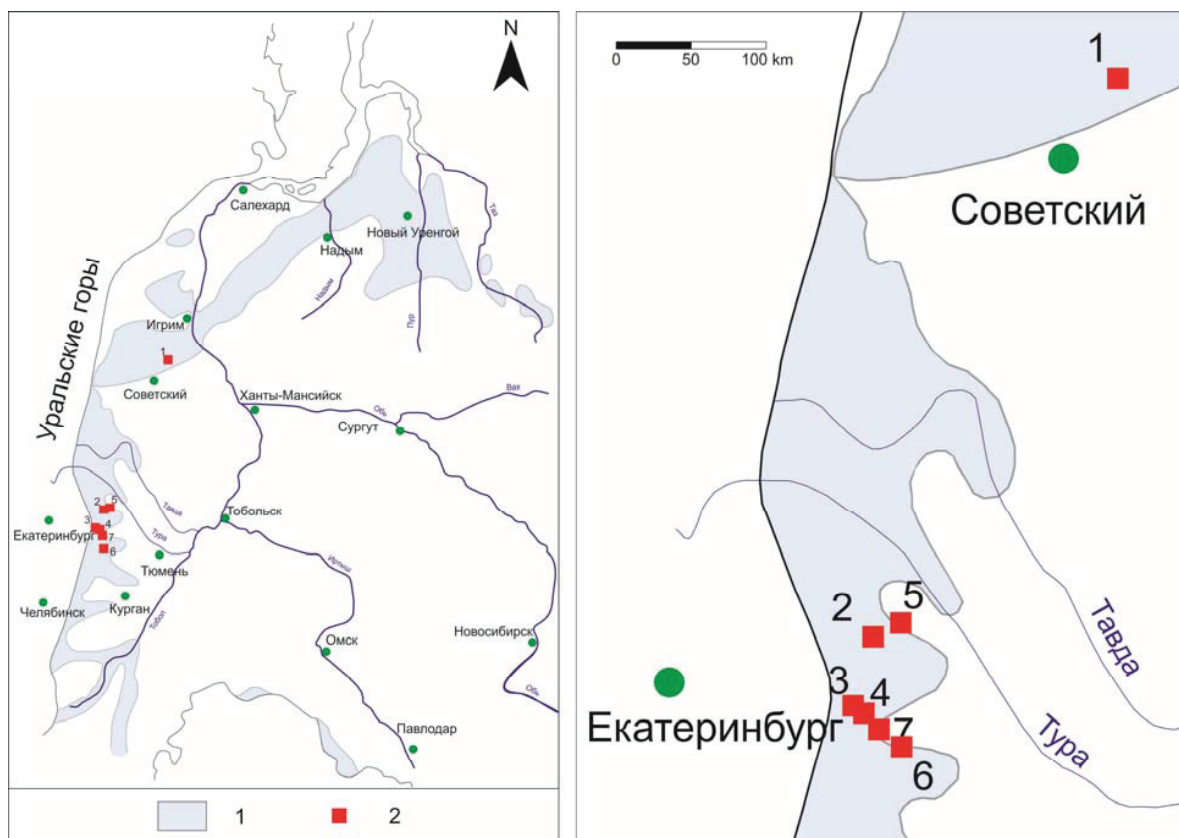


Рис. 1. Расположение объектов исследования: 1 – основная зона приповерхностного залегания опал-кristобалитовых пород; 2 – объекты исследований (обозначены на карте под номерами): 1 – Акрышевское месторождение; 2 – разрез «Белая Горка»; 3 – разрез Брусяна; 4 – разрез «Брусяна-Лог Луначарского»; 5 – Ирбитское месторождение; 6 – Камышловское месторождение; 7 – Курьинское месторождение

Fig. 1. Location of the study objects: 1 is the main area of near-surface occurrence of opal-cristobalite rocks; 2 are the objects (indicated by numbers on the map): 1 is the Akryshevskoe deposit; 2 is the Belaya Gorka section; 3 is the Brusyana section; 4 is the Brusyana-Log Lunacharskogo section; 5 is the Irbit deposit; 6 is the Kamyshlov deposit; 7 is the Kur'i deposit

Акрышевское (=Агиришское) месторождение диатомитов и опок ($61^{\circ}56'18.84''N$, $63^{\circ}8'39.55''E$). Расположено у пос. Агириш Советского района Ханты-Мансийского автономного округа Тюменской области на правобережье р. Малая Сосьва к востоку от железной дороги Советский–Агириш.

Белая Горка, разрез диатомитов ($57^{\circ}36'34.62''N$, $62^{\circ}47'59.40''E$). Расположен в окрестностях деревень Речкалова и Симанова Ирбитского района Свердловской области на правом берегу р. Ирбит. Длина обнажения около 300 м.

Брусяна, разрез диатомитов ($56^{\circ}56'51.43''N$, $61^{\circ}55'43.27''E$). Естественное обнажение на правом берегу р. Калиновка, расположенное в 3 км к северо-востоку от д. Брусяна и в 3 км к юго-западу от д. Глядены городского округа Сухой Лог Свердловской области. На протяжении 200–300 м вскрываются диатомиты, перекрытые маломощным слоем современных отложений.

Брусяна-Лог Луначарского, разрез трепелов ($56^{\circ}56'59.74''N$, $61^{\circ}55'7.06''E$). Естественное обнажение в 200 м от северо-восточной окраины д. Брусяна городского округа Сухой Лог Свердловской области в старом сухом русле р. Калиновка.

На протяжении сотен метров вскрываются трепелы, белые и светло-желтые. Выделено впервые П.В. Смирновым, А.О. Константиновым, А.А. Новосёловым в 2016 г. [19].

Ирбитское месторождение диатомитов ($57^{\circ}39'33.16''N$, $63^{\circ}3'37.18''E$). Расположено на юго-восточной окраине г. Ирбит Свердловской области, в 2 км юго-восточнее железнодорожной станции Ирбит в непосредственной близости от стекольного завода.

Камышловское месторождение диатомитов ($56^{\circ}51'37.42''N$, $62^{\circ}43'35.18''E$). Расположено на северо-восточной окраине г. Камышлов Свердловской области в 2 км от железнодорожной станции Камышлов.

Курьинское месторождение опок и трепелов ($56^{\circ}53'15.17''N$, $62^{\circ}7'25.24''E$). Расположено 6 км к востоку от г. Сухой Лог Свердловской области, в 4 км к северо-востоку от железнодорожной станции Кунара. Для лабораторных исследований отобраны образцы опок.

Лабораторные исследования включали в себя определение минералогической и объемной плотностей, пористости, удельной поверхности образ-

цов кремнистых пород. Определение удельной поверхности методом БЭТ (метод Брюнера–Эммета–Теллера (Brunauer–Emmett–Teller)) выполнено в Лаборатории физико-химических методов исследования Уральского научно-исследовательского химического института (АО «Унихим с ОЗ», г. Екатеринбург) на приборе Carlo Erba Sorptu 1750. Плотность и пористость (по керосину) исследованы на лабораторной базе ООО «Западно-Сибирский геологический центр» (г. Тюмень). Диагенетические преобразования и фазовые переходы кремнезема контролировались с помощью сканирующей электронной микроскопии на аппаратно-программном комплексе на базе растрового электронного микроскопа JEOL JSM 6510A (Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень).

Основное внимание уделялось изучению масштабов и характера новообразований в поровом пространстве и на поверхности кремнистых микрофоссилий. Литологические и геохимические характеристики для большинства диатомитов взяты из предыдущих работ [1, 20], а для пород с естественных разрезов Белая Горка и Брусяна-Лог Луначарского определены впервые в лаборатории минералогии и геохимии исследований Технического Университета Клаусталь (г. Клаусталь-Целлерфельд, Германия). Терминология полиморфных модификаций кремнезема приведена в соответствии с фундаментальным трудом J.B. Jones, E.R. Segnit [21] и дополнившей его работой Heaney et al. [22].

Jones, Segnit [21] выделяли три группы опаловых минералов: опал-А, опал-С (опал-кristобалит) и опал-СТ (опал-кristобалит-тридимит). Для диагностики опал-С необходима оценка содержания сиольного и молекулярного типов вод: в опал-С содержание молекулярной воды не превышает первых процентов, в опал-СТ достигает 10 % [23, 24]. По причине сложной диагностики с помощью стандартных аналитических методов и в силу редкой встречаемости опал-С во всех типах пород характеристика минеральных фаз кремнезема в настоящей работе произведена с использованием только двух категорий опаловых минералов: опал-А и опал-СТ. Как будет показано ниже, масштабы модификационных изменений для диатомитов, опок и трепелов могут быть оценены даже без специальных минералогических исследований – с помощью сканирующей электронной микроскопии.

Результаты и их обсуждение

Широкий рефлекс рассеяния рентгеновских лучей в районе углов 2θ от 20° до 26° на рентгенограммах («аморфное гало»), полосы $525, 800, 1630 \text{ см}^{-1}$ на инфракрасных спектрах, результаты определения химического состава указывают, что преобладающей модификацией кремнезема в опал-кristобалитовых породах является опал с начальными признаками формирования решетки кристобалита [1, 2, 20]. В системе модификационных переходов кремнезема (рис. 2) степень литификации биокремнистых отложений Зауралья из-



Рис. 2. Система полиморфных переходов минералов кремнезема (по J. Warren [23]) и уровень литификации опал-кristобалитовых пород Зауралья (по данным автора [1, 20])

Fig. 2. System of polymorphic transitions of silica minerals (according to J. Warren [23]) and lithification grade of opal-cristobalite rocks (according to the author [1, 20])

меняется от смешанных фаз кремнезема (опал-А, опал-СТ) через опал-СТ до смешанных фаз (опал-А, опал-СТ, микрокристаллический кварц).

Изучение структур пород по электронно-микроскопическим снимкам на предмет наличия признаков диагенетических преобразований крем-

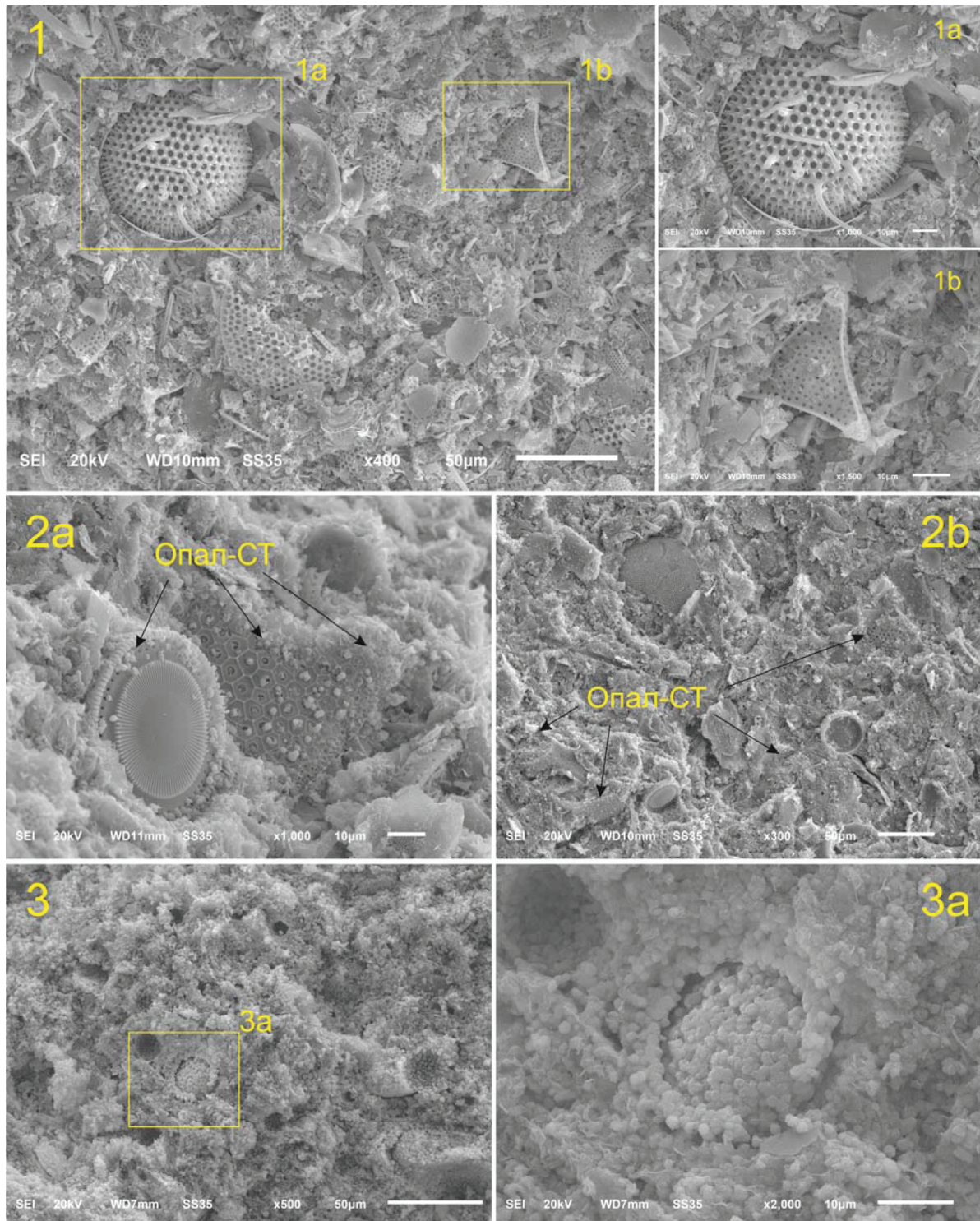


Рис. 3. Микроструктуры пород I, II и III морфологических групп: 1а, 1б – раковины диатомовых водорослей без леписфер опал-СТ (диатомит, разрез Брусяна); 2а, 2б – новообразования опал-СТ (диатомиты/опоки, Акрышевское месторождение); 3а – реликты биоморфной структуры в опоках (опоки, Курьинское месторождение)

Fig. 3. Microstructures of rocks of I, II and III morphological groups: 1а, 1б – diatom frustules without opal-CT lepisfers (diatomite, Brusyana section); 2а, 2б – opal-CT neocrystallization (diatomites/opokas, Akryshevskoye deposit); 3а – relics of the biomorphic structure in opokas (Kur'i deposit)

незема позволяет выделить четыре морфологические группы.

Породы первой группы – диатомиты с четкой биоморфной структурой и несущественным содержанием опал-СТ в своем составе. Характеризуются обилием фрагментов и целых створок диатомовых водорослей хорошей сохранности. Поровое пространство раковин диатомей «чистое», часто полностью свободно от глинистых минералов; сколь либо явных признаков раскристаллизации в опал-СТ не наблюдается (рис. 3, 1а, 1б). К этой группе пород, из числа изученных, автором отнесены диатомиты обнажений Брусяна и Белая Горка и Ирбитского и Камышловского месторождений.

Вторая группа объединяет породы с биоморфной микроструктурой, где микрокристаллический опал-СТ в виде леписфер с ребристой или гладкой поверхностью заполняет поровое пространство как между фрагментами и целыми панцирями диатомей, так и непосредственно в сложнопостроенных створках диатомовых водорослей различного размера и формы (рис. 3, 2а, 2б). Эту группу представляют породы Акрышевского месторождения. Важно отметить, что эти породы даже макроскопически проявляют близость к опокам – они относительно крепкие, плотные образования.

В опоках Курьинского месторождения (III морфологическая группа) четко видно, что порода уже полностью потеряла свою биоморфную микроструктуру, однако новообразования минералов кремнезема нередко повторяют контуры кремнистых микрофоссилий (рис. 3, 3а). На фоне опаловой массы встречаются реликты раковин диатомовых с признаками их трансформации и замещения бесструктурной массой различных модификаций кремнезема.

Трепелы из обнажения Брусяна-Лог Луначарского формируют четвертую группу пород. В них отсутствуют признаки первичной биогенной структуры (рис. 4), они сложены мельчайшими

глобулами опал-СТ размерами в основном 0,06–0,001 мм. Глобулы контактируют между собой, перемежаясь как с частицами других минеральных фаз (глин, кварца, реже полевых шпатов) [25], так и непосредственно друг с другом. В целом для трепелов характерны конденсационные структуры с признаками начала перехода в кристаллизационные. В трепелах отмечается повышенное, по сравнению с диатомитами, количество ультрапор (в структуре глобул с эффективными радиусами менее 0,25 нм).

При комплексировании полученных данных с результатами определения физических свойств кремнистых пород устанавливается ряд закономерностей. По мере диагенетических преобразований фиксируются увеличение содержания SiO_2 от диатомитов через опоки к трепелам, и вместе с тем повышение плотности и уменьшение пористости (рис. 5). В трепелах структура формируется при разрушении и растворении диатомей, в результате происходит замена на агрегаты с относительно тонкими и близкими по размеру зернами опал-А и опал-СТ, что приводит также и к значительному – до 92 % – увеличению содержания кремнезема.

Заключение

По результатам проведенных исследований можно констатировать, что при сравнении пород, находящихся на различных стадиях диагенеза, устанавливаются существенные различия в содержании кремнезема и полуторных оксидов. По мере диагенетических преобразований и потери биоморфной структуры фиксируется увеличение содержания кремнезема и повышение плотности. Крайне показателен с этой точки зрения пример с изученными обнажениями около д. Брусяна: два предельно близко расположенных объекта минерально-сырьевой базы с макроскопически неразличимыми породами сложены соответственно диатомитами и трепелами, для которых значения по-

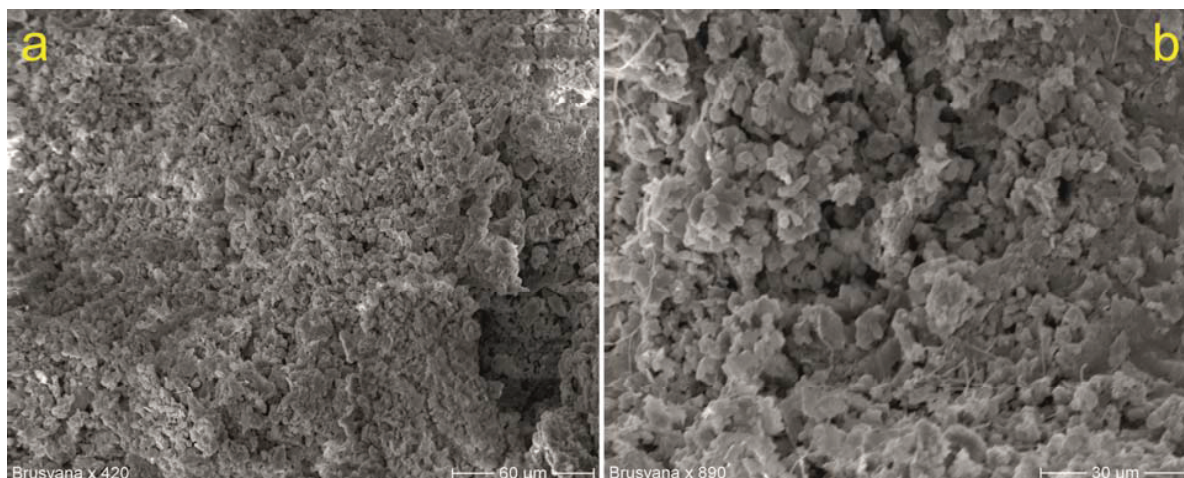


Рис. 4. Глобулярная микроструктура трепелов (разрез Брусяна-Лог Луначарского): а) общий вид трепелов под микроскопом; б) неизометричность частиц кремнезема

Fig. 4. Globular tripolite microstructure (Brusyana-Log Lunacharskogo section): а) general view of tripolite under a microscope; б) non-isometric silica particles

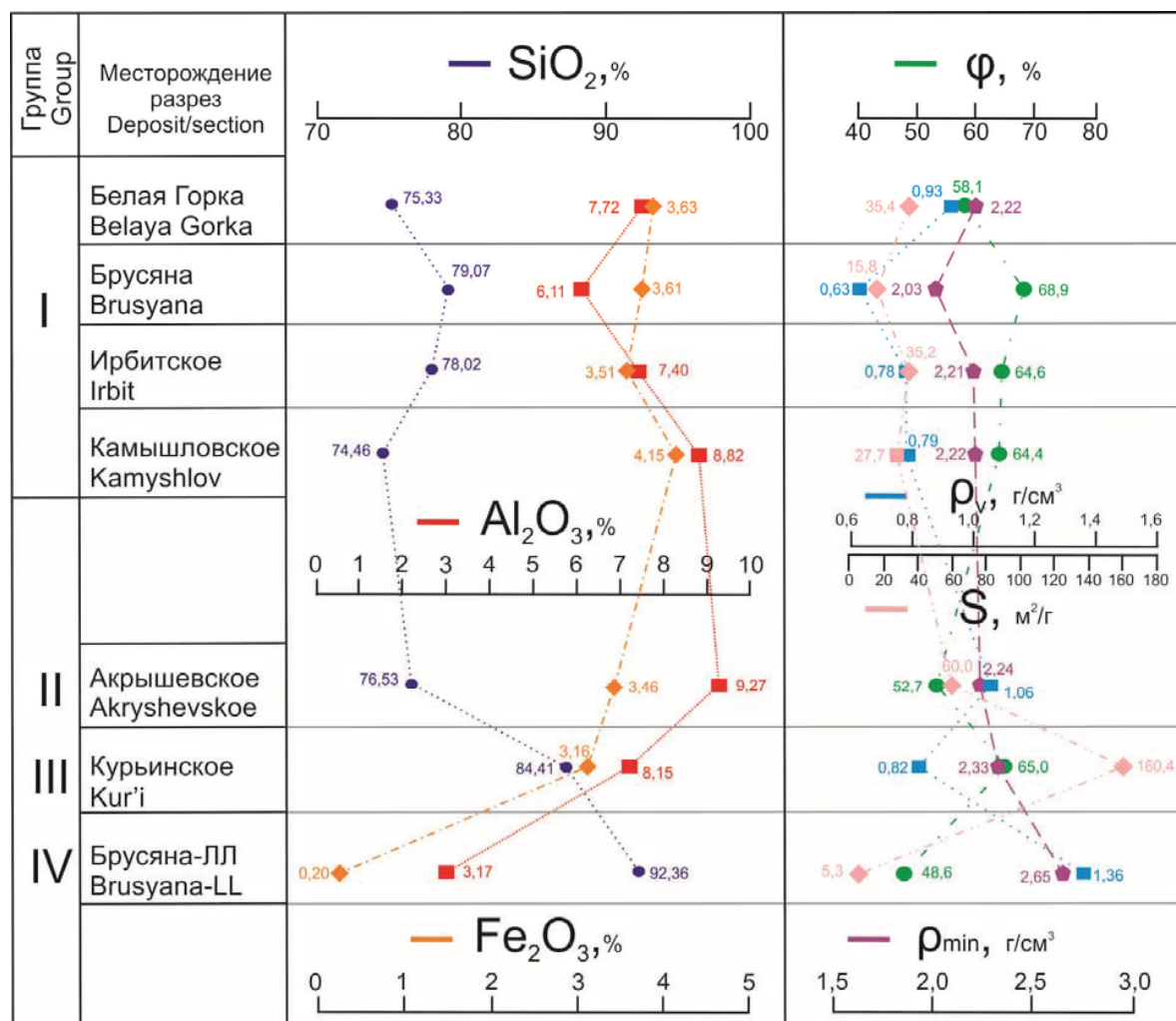


Рис. 5. Связь вариативности основных промышленно значимых свойств опал-кристобалитовых пород со степенью их литификации: φ – коэффициент пористости; ρ_v – плотность объемная; ρ_{min} – плотность минеральная; S – удельная поверхность

Fig. 5. Relation between variability of the main industrially significant properties of opal-cristobalite rocks and dependence and degree of lithification: φ – the porosity coefficient; ρ_v – the bulk density; ρ_{min} – the mineral density; S – the specific surface area

риности, плотности и удельной поверхности отличаются существенно. Разница в содержании SiO₂ достигает 12–13 %.

В случае если литификация кремниевого биогенного материала происходила постепенно и по всей массе осадка, у вновь образованных пород – опок – уменьшение пористости, связанное с деградацией биогенной структуры, сочетается с увеличением удельной поверхности. Кремнистые осадки, седиментогенез которых происходил в более активной гидродинамической среде, преобразуются в трепелы [25], которые «проигрывают» и диатомитам, и опокам по большинству промышленно значимых свойств. Трепелы в отличие от диатомитов, опок и их глинистых разновидностей обладают принципиально другими свойствами: большим удельным весом, меньшими пористостью и удельной поверхностью и, соответственно, меньшей способностью к сорбции. В естественном состоянии трепелы пластичностью не обладают: приобретают

ее при нарушении структурных связей, при естественной влажности не размокают, а будучи помещенными в воду в воздушно-сухом состоянии в течение нескольких минут растрескиваются, распадаясь на обломки. Исключение составляет соотношение оксидов Si, Al, Fe: по этому показателю трепелы превосходят другие разновидности опал-кристобалитовых пород и могут рассматриваться как уникальное высококремнистое маложелезистое сырье.

Совместное нахождение опал-А и опал-СТ в биокремнистых отложениях способствует их «окремнению» и повышению механических свойств, обеспечивая дополнительную цементацию породы [26, 27], что видно на примере пород Акрышевского месторождения. Существование опала-СТ в очень молодых и поверхностных породах [28] также показывает, что время не обязательно является «причиной» в диагенезе кремнезема: диатомиты разреза Брусьяна содержат более

древний комплекс диатомовых водорослей *Trinacria ventriculosa-Sheshukovia mirabilis* и, соответственно, древнее пород с Акрышевского месторождения, однако в них отсутствуют новообразования кремнезема и степень литификации ниже.

Анализ преобладающих форм кремнезема, равно как изменчивости минерального и химического состава по разрезу, имеет значение при изучении месторождений, имеющих длительную историю разработки и существенные глубины. При продолжительной эксплуатации таких объектов минерально-сырьевой базы породами, вовлекающимися в разработку, становятся отложения, свойства которых отличны от тех, что исследовались лабораторно на этапе разведки.

Такого рода исследования должны лежать в основе дополнения промышленной классификации опал-кristобалитовых пород, которая учитывала бы не столько фазовые переходы кремнезема, о которых шла речь в настоящей статье, сколь обуславливаемые ими свойства. Вынесенные в принятую промышленную классификацию [29] типы сырья

(т. е. разности пород – диатомиты, опоки, трепелы) и их градация по степени качеству (высококондиционное, низкокондиционное) не отражают всего многообразия возможных сочетаний свойств опал-кristобалитовых пород, а тем более возможных направлений их использования. Используемая классификация лишь воспроизводит устаревшую к настоящему моменту систему переработки, ориентированную на производство товаров с низкой добавленной стоимостью. Возможность разделения пород по качеству видна на примере объектов, составляющих первую морфологическую группу. Из их числа существенно меньшей удельной поверхностью (разница в 1,75–2,24 раза), при близости значений других свойств, обладают диатомиты обнажения Брусяна, в отличие от трех других одновозрастных и сложенных идентичным комплексом кремнескелетной фауны диатомитов. Аналогично по мере расширения выборки изучаемых опок и трепелов появится возможность также аргументированно дифференцировать их на группы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов П.В., Константинов А.О. Сравнительные исследования эоценовых и палеоценовых диатомитов Зауралья (на примере Камышловского месторождения и разреза Брусяна) // Известия Томского Политехнического Университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 11. – С. 96–102.
2. Ушатинский И.Н., Гаврилова Л.М. Вещественный состав и формы кремнезема кремнистых пород кайнозоя и мезозоя Западной Сибири // Комплексное освоение минерально-сырьевых ресурсов Западной Сибири. – Тюмень: ЗапСибНИГНИ, 1985. – С. 10–15.
3. Williams L.A., Crerar D.A. Silica diagenesis, II. General mechanisms // Journal of Sedimentary Petrology. – 1985. – V. 55. – № 3. – P. 312–321.
4. Williams L.A., Parks G.A., Crerar D.A. Silica diagenesis, I. Solubility controls // Journal of Sedimentary Petrology. – 1985. – V. 55. – № 3. – P. 301–311.
5. Kastner M., Keene J.B., Gieskes J.M. Diagenesis of siliceous ooze, I. Chemical controls on the rate of opal-A to opal-CT transformation-an experimental study // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1977. – № 41. – P. 1041–1059.
6. Tada R., Lijima A. Petrology and diagenetic changes of Neogene siliceous rocks in northern Japan // Journal of Sedimentary Petrology. – 1983. – № 53. – P. 911–930.
7. Chaika C., Dvorkin J. Ultrasonic velocities of opaline rocks undergoing silica diagenesis // Geophysical Research Letters. – 1997. – № 24. – P. 2039–2042.
8. Opal-A/opal-CT phase boundary inferred from bottom-simulating reflectors in the southern South Korea Plateau, East Sea (Sea of Japan) / G.H. Lee et al. // Geophysical Research Letters. – 2003. – V. 30. – № 24. – 2238. DOI: 10.1029/2003GL018670.
9. Davies R.J., Gouly N.R., Meadows D. Fluid flow due to the advance of basin scale silica reaction zones // Geological Society of America Bulletin. – 2008. – № 120. – P. 195–206.
10. Mechanical strength of the transition zone at the boundary between opal-A and opal-CT zones in siliceous rocks / E. Ishii et al. // Engineering Geology. – 2011. – V. 122. – № 3. – P. 215–221.
11. Lynne B.Y. Impact of three common post-depositional environmental settings on siliceous sinter diagenesis: an eight year experiment // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2015. – V. 292. – № 1. – P. 84–101. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2015.01.007.
12. Keene J.B. Cherts and Porcellanites from the North Pacific // Deep Sea Drilling Project. – 1975. – № 32. – P. 429–507. DOI: 10.2973/dsdp.proc.32.114.1975.
13. Kastner M. Silica polymorphs // Marine Minerals. – 1979. – № 6. – P. 99–106.
14. Hein J.R., Sancetta C., Morgenson L.A. Petrology and Geochemistry of Silicified Upper Miocene Chalk, Costa Rica Rift // Deep Sea Drilling Project. – 1983. – № 69. – P. 395–422. DOI: 10.2973/dsdp.proc.69.116.1983.
15. Stamatakis M., Magganis A.C. Thermally induced silica transformation of Pliocene diatomaceous layers from Aegina island Greece // Siliceous deposits of Tethys and Pacific regions. – New York: Springer-Verlag, 1988. – P. 141–150.
16. Lynne B.Y., Campbell K.A. Diagenetic transformations (opal-A to quartz) of low and mid-temperature microbial textures in siliceous hot-spring deposits, Taupo Volcanic Zone, New Zealand // Canadian Journal of Earth Sciences. – 2003. – V. 40. – № 11. – P. 1679–1696.
17. Fossil diatoms from endogangue of the Ypresian phosphatic pellets of the Gafsa-Metlaoui basin: implication on the origin of biogenic silica and depositional environment / A.H. Ahmed, A. Tlili, A. Zalat, Y. Jeddoui // Arabian Journal of Geosciences. – 2015. – V. 8. – № 2. – P. 1077–1087.
18. Geilert S., Vroon P.Z., Van Bergen M.J. Effect of diagenetic phase transformation on the silicon isotope composition of opaline sinter deposits of Geysir, Iceland // Chemical Geology. – 2016. – № 433. – P. 57–67.
19. Смирнов П.В. Предварительные результаты ревизии минерально-сырьевой базы опал-кristобалитовых пород в Среднем Зауралье // Известия Томского Политехнического Университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 4. – С. 28–37.
20. Смирнов П.В. Результаты комплексных исследований вещественного состава диатомитов Ирбитского месторождения // Известия Томского Политехнического Университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 6. – С. 93–104.
21. Jones J.B., Segnit E.R. The nature of opal. I. Nomenclature and constituent phases // Australian Journal of Earth Sciences. – 1971. – № 18. – P. 57–68.

22. Silica: Physical Behavior, Geochemistry, and Materials Applications / ed. by P.J. Heaney, C.T. Prewitt, C.V. Gibbs. – Washington, D.C.: Mineralogical Society of America, 1994. – 606 p.
23. Warren J. Silica mobility and replaced evaporites: 2 – replaced CaSO₄ <http://www.saltworkconsultants.com/blog/silica-mobility-and-replaced-evaporites-2-replaced-caso4-02> (дата обращения: 25.05.2017).
24. Day R., Jones B. Variations in water content in opal-a and opal-CT from geyser discharge aprons // Journal of Sedimentary Research. – 2008. – V. 78. – № 4. – P. 301–315.
25. Силицитовые породы Воронежской антеклизы и Среднего Поволжья / Н.И. Афанасьева, Д.А. Дмитриев, А.В. Жабин, С.О. Зорина // Вестник ВГУ, Серия: Геология. – 2006. – № 2 – С. 68–76.
26. DeMaster D.J. The Diagenesis of Biogenic Silica: Chemical Transformations Occurring in the Water Column, Seabed, and Crust (Second Edition) // Treatise on Geochemistry. – 2014. – № 9. – P. 103–111.
27. Silica diagenesis and benthic fluxes in the Arctic Ocean / C. Marza, A.-K. Meinhardt, B. Schnetger, H.-J. Brumsack // Marine Chemistry. – 2015. – V. 171. – P. 1–9.
28. Jones B., Renaut R.W. Microstructural changes accompanying the opal-A to opal-CT transformation: new evidence from the siliceous sinters of Geysir, Haukadalur, Iceland // Sedimentology. – 2007. – V. 54. – № 4. – P. 921–949.
29. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Кремниевые породы. – М.: Министерство природных ресурсов Российской Федерации, 2007. – 36 с.

Поступила 26.05.2017 г.

Информация об авторах

Смирнов П.В., заместитель директора НОЦ «Геология нефти и газа» Тюменского индустриального университета; научный сотрудник Института Геологии и Палеонтологии Технического университета Клаусталь.

UDC 552.581; 552.144; 553.69; 553.578

SILICA PHASE TRANSITIONS IN OPAL-CRISTOBALITE ROCKS AS A FACTOR OF QUALITY OF SILICEOUS RAW MATERIAL

Pavel V. Smirnov,
geolog.08@mail.ru

Industrial University of Tyumen,
38, Volodarsky Street, Tyumen, 625000, Russia.

Relevance of the discussed issue. In diatomite and clayey diatomite during diagenetic transformations, there is a disturbance or partial loss of biomorphic structure, which determines the unique properties of diatomites as raw materials for production of filtering and sorption-active materials. Structure transformation is accompanied as well by the change in material composition due to the polymorphic transitions of silica – opal-A in opal-CT, and at deeper transformations – further into cristobalite, tridymite. The changes in structure and mineral composition inevitably lead to the changes in industrially significant properties of opal-cristobalite rocks: density, porosity, specific surface, mechanical strength, etc. To date, the Russian scientific literature has little information on the fact that technological properties and quality of siliceous raw materials are controlled by the degree of diagenetic transformation, this relationship is not shown as well on the example of specific mineral resource base facilities.

The main aim is to analyze the effect of the degree of diagenetic transformations and phase transitions of opal-A in opal-CT in opal-cristobalite rocks on industrially significant properties: porosity, density, specific surface.

The methods used in the research: field studies, X-ray fluorescence analysis, scanning electron microscopy, determination of porosity, density, specific surface area (BET method).

The results. For the first time, the relationship between the physical properties, chemical composition and phase transitions of silica in rocks is shown for the objects of mineral-raw-material base of opal-cristobalite rocks of the Transuralian region and North Western Siberia. According to the results of the studies carried out, it can be stated that when comparing rocks in different stages of diagenesis, significant differences in the content of silica and sesquioxides are determined. At diagenetic transformations one can observe the growth of silica content and at the same time increase in density, reduction in porosity and change in the specific surface. According to the scanning electron microscopy data, the studied opal-cristobalite rocks were classified into four groups.

Key words:

Diatomite, tripolite, opoka, silica, opal-A, opal-CT, diagenesis, Transuralian region, Western Siberia.

REFERENCES

- Smirnov P.V., Konstantinov A.O. Comparative studies of Eocene and Paleocene diatomite from Trans-Urals (on the example of Kamyshlov deposit and section Brusyana). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 11, pp. 96–102. In Rus.
- Ushatinskiy I.N., Gavrilova L.M. Veshchestvennyy sostav i formy kremnezema kremnistykh porod kaynozoya i mezozoya Zapadnoy Sibiri [Material composition and silica phases of siliceous rocks on Cenozoic and Mesozoic of Western Siberia]. *Kompleksnoe osvoenie mineralno-syrevykh resursov Zapadnoy Sibiri* [Complex exploration of mineral resources in Western Siberia]. Tyumen, ZapSibNIGNI Publ., 1985. pp. 10–15.
- Williams L.A., Crerar D.A. Silica diagenesis, II. General mechanisms. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1985, vol. 55, no. 3, pp. 312–321.
- Williams L.A., Parks G., Crerar D.A. Silica diagenesis, I. Solubility controls. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1985, vol. 55, no. 3, pp. 301–311.
- Kastner M., Keene J.B., Gieskes J.M. Diagenesis of siliceous ooze, I. Chemical controls on the rate of opal-A to opal-CT transformation-an experimental study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1977, no. 41, pp. 1041–1059.
- Tada R., Lijima A. Petrology and diagenetic changes of Neogene siliceous rocks in northern Japan. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1983, no. 53, pp. 911–930.
- Chaika C., Dvorkin J. Ultrasonic velocities of opaline rocks undergoing silica diagenesis. *Geophysical Research Letters*, 1997, no. 24, pp. 2039–2042.
- Lee G.H., Kim H.-J., Jou H.-T., Cho H.-M. Opal-A/opal-CT phase boundary inferred from bottom-simulating reflectors in the southern South Korea Plateau, East Sea (Sea of Japan). *Geophysical Research Letters*, 2003, vol. 30, no. 24, pp. 2238. DOI: 10.1029/2003GL018670.
- Davies R.J., Goult N.R., Meadows D. Fluid flow due to the advance of basin scale silica reaction zones. *Geological Society of America Bulletin*, 2008, no. 120, pp. 195–206.
- Ishii E., Sanada H., Iwatsuki T., Sugita Y., Kurikami H. Mechanical strength of the transition zone at the boundary between opal-A and opal-CT zones in siliceous rocks. *Engineering Geology*, 2011, no. 122, pp. 215–221. DOI: 10.1016/j.enggeo.2011.05.007.
- Lynne B.Y. Impact of three common post-depositional environmental settings on siliceous sinter diagenesis: an eight year experiment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2015, vol. 292, no. 1, pp. 84–101.
- Keene J.B. Cherts and Porcellanites from the North Pacific. *Deep Sea Drilling Project*, 1975, vol. 32, pp. 429–507. DOI: 10.2973/dsdp.proc.32.114.1975.
- Kastner M. Silica polymorphs. *Marine Minerals*, 1979, no. 6, pp. 99–106.
- Hein J.R., Sancetta C., Morgenson L.A. Petrology and Geochemistry of Silicified Upper Miocene Chalk, Costa Rica Rift. *Deep Sea Drilling Project*, 1983, vol. 69, pp. 395–422. DOI: 10.2973/dsdp.proc.69.116.1983.
- Stamatakis M., Magganis A.C. Thermally induced silica transformation of Pliocene diatomaceous layers from Aegina island Greece. *Siliceous deposits of Tethys and Pacific regions*. New York. Springer-Verlag, 1988. pp. 141–150.
- Lynne B.Y., Campbell K.A. Diagenetic transformations (opal-A to quartz) of low and mid-temperature microbial textures in siliceous hot-spring deposits, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2003, vol. 40, no. 11, pp. 1679–1696.
- Ahmed A.H., Tlili A., Zalat A., Jeddoui Y. Fossil diatoms from endogangue of the Ypresian phosphatic pellets of the Gafsa-Metlaoui basin: implication on the origin of biogenic silica and depositional environment. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, vol. 8, no. 2, pp. 1077–1087.

18. Geilert S., Vroon P.Z., van Bergen M. J. Effect of diagenetic phase transformation on the silicon isotope composition of opaline sinter deposits of Geysir, Iceland. *Chemical Geology*, 2016, no. 433, pp. 57–67.
19. Smirnov P.V. Preliminary results of revision of mineral-raw material base of opal-cristobalite rocks in Middle Trans-Urals. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 4, pp. 28–37. In Rus.
20. Smirnov P.V. Results of comprehensive studies of diatomite material composition from Irbit deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 6, pp. 93–104.
21. Jones J.B., Segnit E.R. The nature of opal. I. Nomenclature and constituent phases. *Australian Journal of Earth Sciences*, 1971, no. 18, pp. 57–68.
22. *Silica: Physical Behavior, Geochemistry, and Materials Applications* / ed. by P.J. Heaney, C.T. Prewitt, C.V. Gibbs. Washington, D.C., Mineralogical Society of America, 1994. 606 p.
23. Warren J. Silica mobility and replaced evaporites: 2 – replaced CaSO₄. <http://www.saltworkconsultants.com/blog/silica-mobility-and-replaced-evaporites-2-replaced-caso4-02> (accessed 25 May 2017).
24. Day R., Jones B. Variations in water content in opal-A and opal-CT from geyser discharge aprons. *Journal of Sedimentary Research*, 2008, vol. 78, no. 4, pp. 301–315.
25. Afanaseva N.I., Dmitriev D.A., Zhabin A.V., Zorina S.O. Silitsitovyie porody Voronezhskoy anteklizy i Srednego Povolzhya [Siliceous rocks of Voronezh Antecline and Middle Povolzhye]. *Vestnik VGU, Seriya: Geologiya*, 2006, no. 2, pp. 68–76.
26. DeMaster D.J. The Diagenesis of Biogenic Silica: Chemical Transformations Occurring in the Water Column, Seabed, and Crust (Second Edition). *Treatise on Geochemistry*, 2014, no. 9, pp. 103–111.
27. Marza C., Meinhardt A.-K., Schnetger B., Brumsack H.-J. Silica diagenesis and benthic fluxes in the Arctic Ocean. *Marine Chemistry*, 2015, no. 171, pp. 1–9.
28. Jones B., Renaut R.W. Microstructural changes accompanying the opal-A to opal-CT transformation: new evidence from the siliceous sinters of Geysir, Haukadalur, Iceland. *Sedimentology*, 2007, vol. 54, no. 4, pp. 921–949.
29. *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu Klassifikatsii zapasov mestorozhdeny i prognoznykh resursov tverdykh poleznykh iskopaemykh. Kremnievye porody* [Methodical recommendations on application of the Classification of the reserves of deposits and the forecast resources of solid minerals. Siliceous rocks]. Moscow, Ministry of Natural Resources of the Russian Federation Publ., 2007. 36 p.

Received: 26 May 2017.

Information about the authors

Pavel V. Smirnov, deputy director, Industrial University of Tyumen.

УДК 004.67:910.27 (075.8)

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ПРЕДПРИЯТИЙ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ: ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ, АРХИТЕКТУРА И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Марков Николай Григорьевич,

markovng@tpu.ru

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

Актуальность работы определяется необходимостью интеллектуализации производства предприятий нефтегазовой отрасли с использованием самых современных методов обработки и анализа данных и информационно-телекоммуникационных технологий. При этом особую значимость сегодня имеют геоинформационные системы (ГИС). Они позволяют обрабатывать и анализировать не только атрибутивные, но и пространственные данные о производственных объектах добывающих и транспортирующих углеводородное сырье предприятий отрасли.

Цель работы: анализ функциональности и архитектуры современных универсальных ГИС на соответствие требованиям предприятий нефтегазовой отрасли и выявление перспективных направлений развития таких систем.

Методы исследования: системный анализ универсальных ГИС и ГИС-платформ на основе сформулированных требований к их характеристикам и функциональности исходя из необходимого перечня решаемых с их помощью классов задач отрасли; методы анализа архитектур информационных систем различного назначения.

Результаты. Показано, что на предприятиях нефтегазовой отрасли имеется большое число классов задач, которые необходимо решать с помощью ГИС; проведен анализ векторных универсальных ГИС на соответствие требованиям предприятий отрасли, и сделан вывод, что среди них существуют четыре ГИС-платформы, удовлетворяющие этим требованиям и позволяющие создавать проблемно-ориентированные ГИС для решения разных классов задач отрасли; проанализированы различные архитектуры универсальных ГИС, и по результатам анализа разработана концептуальная архитектура корпоративной ГИС в узком смысле; в рамках этой архитектуры разработан способ организации пространственных баз данных, и предложены перспективные направления развития таких корпоративных ГИС; разработана архитектура, и описаны функции корпоративной ГИС «Магистраль-Восток» для управления производством нефтегазодобывающего предприятия.

Ключевые слова:

Предприятия нефтегазовой отрасли, пространственные данные, универсальные геоинформационные системы, корпоративные геоинформационные системы.

Введение

В последнее десятилетие большинство крупных предприятий нефтегазовой отрасли выделяют всё больше финансовых ресурсов на развитие систем автоматизации не только технологических процессов, но и многих производственных процессов. При этом наряду с информационными системами управления ресурсами предприятий часто приобретаются и внедряются географические информационные системы – ГИС), позволяющие специалистам различных служб обрабатывать и анализировать не только атрибутивные, но и пространственные данные (иногда говорят геоданные) о технологических объектах, зданиях, сооружениях и т. д.

Исторически сложилось так, что в геологической и нефтегазовой отраслях как в России, так и за рубежом полнофункциональные автоматизированные системы обработки и интерпретации геолого-геофизических данных и моделирования нефтяных и газовых резервуаров месторождений углеводородного сырья (УВС), у которых есть отдельные функции анализа пространственных данных, появились значительно раньше, чем ГИС с развитым набором средств пространственного анализа, ориентированные на эти отрасли. К таким полнофункциональным системам обработки и интерпретации геолого-геофизических данных можно отнести IES/IESX, CHARISMA-Seismic (компания Schlum-

berger, Франция), Integral+ (компания CGG-Petro-systems, Франция), Z-Map Plus (компания Landmark, Франция), СЦС-5 и DV-Geo (Центральная геофизическая экспедиция, Россия) и др. [1]. К развитым системам геологического и гидродинамического моделирования нефтяных и газовых резервуаров, востребованным службами промышленной геологии и разработки месторождений добывающих предприятий, следует отнести системы Roxar/RMS и Roxar Tempest (компания Roxar, Норвегия) [2], CHARISMA-RM, Eclipse и Petrel (компания Schlumberger Ltd, США, Франция) [3] и т. п. Все эти системы, как и упомянутые системы обработки и интерпретации геолого-геофизической информации, имеют в своем составе программные модули, реализующие только отдельные функции обработки пространственных данных о контурах продуктивных пластов (резервуаров) месторождений, о местоположении скважин и т. д.

Появившиеся несколько позднее универсальные ГИС, в первую очередь, такие, как зарубежные системы ArcInfo, ArcView, затем ArcGIS (компания Esri Inc., США) и MapInfo Professional (компания MapInfo Corp., США), и ряд отечественных систем также оказались весьма востребованными на предприятиях этих отраслей. Более того, в России и Казахстане компания Esri Inc. и некоторые другие зарубежные компании через свои дочерние предприятия активно ведут себя на рынке ГИС,

разрабатывая на базе своих универсальных ГИС проблемно-ориентированные системы для предприятий геологической и нефтегазовой отраслей. В то же время всё большее число специалистов различных производственных служб предприятий нефтегазовой отрасли желают использовать в своей деятельности инструменты для обработки и анализа пространственных данных [4, 5]. Многие из них в качестве таких инструментов видят современные универсальные ГИС, адаптированные к решению задач их производственных служб. Это обусловлено ещё и тем, что именно на основе универсальных ГИС можно создать проблемно-ориентированные геоинформационные системы, позволяющие решать комплексные производственные задачи. Более того, по мнению ряда авторов [6–8], внедрение и использование современных ГИС в нефтегазовой отрасли является одним из важных этапов в решении актуальной проблемы интеллектуализации производства нефтегазодобывающих и нефтегазотранспортных предприятий отрасли. Это указывает на актуальность задачи анализа современного состояния рынка ГИС и анализа возможностей этих систем для нефтегазовой отрасли.

Кроме того, бурное развитие за последние 3–5 лет новых информационных технологий привело к появлению универсальных ГИС с новой архитектурой. Необходимо выявить возможность применения систем с такими архитектурами в нефтегазовой отрасли, в том числе для создания корпоративных ГИС.

Изложенное выше позволяет считать, что актуальность данной работы обусловлена необходимостью дальнейшей интеллектуализации производства предприятий нефтегазовой отрасли, в том числе за счет внедрения современных ГИС. При этом значимыми для топ-менеджеров и специалистов этих предприятий, принимающих решение о внедрении ГИС, являются результаты анализа функционала и архитектуры современных универсальных ГИС. Важными для них будут также исследования способов создания корпоративных ГИС и приведенные в статье результаты внедрения одной из таких систем в нефтегазовой отрасли.

Задачи, решаемые с помощью ГИС

Рассмотрим задачи, которые сегодня можно и следует решать на предприятиях нефтегазовой отрасли с использованием атрибутивных и пространственных данных средствами современных ГИС. Приведем перечень основных классов таких задач для добывающих предприятий:

- мониторинг процессов разработки месторождений УВС и управление добычей УВС (управления фондом скважин месторождений); при этом для анализа в ГИС используются пространственные данные в виде координат скважин, данные инклинометрии по скважинам, данные о контурах залежей (резервуаров) УВС и водонефтяных контактах и т. п. [9, 10]; более того, концепция интеллектуального месторож-

дения (англ. Smart Field/iField) [6, 8] предполагает эффективное управление добычей УВС с использованием интеллектуальных методов и систем управления, в том числе ГИС, с помощью которых ведется сложный пространственный анализ данных с целью принятия эффективных управленческих решений;

- техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) объектов (оборудования) наземной инженерной инфраструктуры промыслов; в этих задачах важна координатная привязка как технологических объектов в целом, так и отдельного входящего в их состав оборудования, привязка линейных объектов типа внутрпромысловые трубопроводные сети сбора УВС и линии электропередач, а также координатная привязка межпромысловых нефтегазопроводов, находящихся в ведении предприятия [4]; такие пространственные данные позволяют решать средствами ГИС как задачи планирования работ по ТОиР с учётом местоположения объектов на картах и технологических схемах, так и задачи оптимизации маршрутов ремонтных бригад, последние задачи особенно важны в случае протяженных линейных объектов;
- ведение имущественного кадастра (технологические объекты промыслов, здания и сооружения и т. п.); при решении этих задач используются пространственные данные для традиционного кадастрового учета, а также построенные ортофотокарты и ортофотопланы;
- ведение кадастра земельных участков, полученных добывающими предприятиями в пользование в соответствии с лицензиями на геологическое изучение недр и (или) разработку месторождений УВС, а также земельных участков, взятых на временное пользование у других субъектов хозяйственной деятельности;
- задачи охраны окружающей среды на территориях, занимаемых промыслами и межпромысловыми сооружениями (нефте- и газопроводами, линиями электропередач и т. д.); при их решении используется картирование и прогнозирование зон загрязнения почвы от разливов нефти, шламовых амбаров с отходами от бурения скважин и тому подобных потенциальных источников загрязнений; важными являются также пространственные данные и результаты их анализа с помощью ГИС о загрязнениях водных объектов, лесных массивов и других природных объектов на территории деятельности добывающих предприятий [11–14].

Классы задач, присущих нефте- и газотранспортным предприятиям отрасли, при решении которых используются пространственные данные и ГИС для их обработки и анализа, в части задач кадастров имущества и земель, а также задач охраны окружающей среды, не сильно отличаются от подобных задач добывающих предприятий. При их решении используются практически те же методы пространственного анализа, что и для добываю-

щих предприятий. Единственная особенность, которую необходимо учитывать при сборе, хранении и анализе пространственных данных транспортными предприятиями, – это обычно большая (сотни и тысячи километров) протяженность линейных технологических объектов (магистральных нефте- и газопроводов) и наличие промежуточных компрессорных станций (цехов), а в случае газовой подотрасли и наличие газораспределительных станций с множеством отводов и развитой сетью газопроводов среднего и низкого давления (межпоселковые и внутригородские (внутрипоселковые) газопроводы) [7].

Эта же особенность технологических объектов нефтегазотранспортных предприятий должна учитываться при создании карт и технологических схем для решения задач их ТОиР и действий в чрезвычайных ситуациях при доставке аварийных бригад. Кроме того, она должна учитываться при использовании ГИС для решения задач обеспечения технической безопасности при эксплуатации магистральных нефте- и газопроводов, в первую очередь, для задач выявления опасных природных и техногенных факторов, влияющих на безопасность нефтегазопроводов, и задач выявления нарушений охранных зон и зон минимальных безопасных расстояний. Пространственные данные для ГИС получают по результатам съемки участков земной поверхности с трассами трубопроводов с космических аппаратов или с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), оснащенных оптическими датчиками сверхвысокого разрешения (0,5 м), а также по результатам мониторинга деформаций поверхности Земли в зонах с активными сейсмическими, геодинамическими, оползневыми и карстовыми процессами, вблизи которых проходят трассы трубопроводов. Такие данные мониторинга получают на основе высокоточных ГЛОНАСС/GPS-измерений и от космической радиолокационной съемки с использованием метода радиолокационной интерферометрии [15]. В настоящее время при охране линейной части магистральных нефтегазопроводов всё чаще используются результаты её мониторинга с целью выявления несанкционированного доступа к трубопроводам, получаемые при космической съемке сверхвысокого разрешения и с БПЛА. В случаях обнаружения несанкционированного доступа ГИС должна позволять решать картографическую задачу прокладки оптимальных маршрутов движения тревожных групп к местам нарушений.

В газовой подотрасли имеется ряд предприятий подземного хранения газа. С помощью ГИС специалисты этих предприятий должны решать тот же перечень классов задач, присущих добывающим предприятиям, поскольку в качестве объекта для хранения газа они часто используют резервуары выработанных месторождений УВС или выработки иной природы в горной толще. Подземные хранилища газа – это сложные технические сооружения с мощной подземной и наземной инженерной инфраструктурой. Закачка и отбор газа из них

выполняются с помощью компрессорных станций через систему скважин. Учитывая возможность активного развития геодинамических и оползневых процессов в районах расположения подземных хранилищ газа, необходим мониторинг состояния наземной инженерной инфраструктуры хранилищ и мониторинг деформаций поверхности Земли. В результате мониторинга территорий хранилищ с использованием оптических датчиков высокого разрешения, установленных на космических аппаратах или БПЛА, и проведения высокоточных ГЛОНАСС/GPS-измерений деформаций земной поверхности получают пространственные данные. В итоге у таких предприятий появляется ещё один класс задач, связанных с анализом в ГИС полученных данных.

Наконец, сегодня отечественные предприятия по добыче УВС на шельфе северных и восточных морей России также начинают интенсивно применять ГИС [16, 17]. Кроме описанных выше классов задач, которые необходимо решать с помощью ГИС специалистам добывающих предприятий, создаются и используются для прогноза обстановки карты ледовой и айсберговой обстановки. Исходные данные для таких карт – радиолокационные и оптико-электронные снимки с космических аппаратов и БПЛА.

Следует отметить, что всем производственным предприятиям нефтегазовой отрасли вне зависимости от вида бизнеса сегодня необходимо решать с помощью ГИС дополнительные классы задач:

- мониторинг пожаров с целью обеспечения пожарной безопасности технологических объектов для добычи, транспорта и хранения нефти, газа и газового конденсата;
- мониторинг и выявление по данным высокоточной съемки из космоса и с помощью БПЛА противоправных посягательств и террористических угроз на технологические объекты предприятий.

Кроме того, некоторые проектные организации, ведущие изыскания и проектирование объектов нефтегазового комплекса, все чаще применяют пространственные данные и ГИС для решения следующих задач:

- картопостроение для проведения инженерных изысканий и собственно проектирования объектов строительства и реконструкции;
- мониторинг деформации земной поверхности при проведении инженерных изысканий под строительство и модернизацию инфраструктуры предприятий.

Современные универсальные ГИС

Первые ГИС для обработки и анализа пространственных данных в нефтегазовой отрасли были узкоспециализированными и позволяли решать одну-две простейших задачи отрасли с помощью нескольких функций пространственного анализа. Конечно, они не могли конкурировать с полнофункциональными системами обработки и интер-

претации геолого-геофизических данных и с системами геологического и гидродинамического моделирования нефтяных и газовых резервуаров, которые имели в то время в своем составе набор функций обработки и анализа пространственных данных, необходимых для реализации отдельных этапов при решении больших проблемных задач геологической и нефтегазовой отраслей.

Однако с конца восьмидесятых годов прошлого столетия появились коммерческие ГИС с большим набором функций для работы с пространственными данными. Среди них стоит отметить такие зарубежные системы, как ArcInfo и ArcView компании Esri Inc. (США) [18, 19], Idrisi университета Кларка (США) [19], MapInfo Professional компании MapInfo Corp. (США) [20] и др. Среди первых отечественных коммерческих ГИС можно назвать ГИС GeoDraw/GeoGraph института географии РАН [21], ГИС «Карта» КБ «Панорама» [22] и т. д. Большинство этих систем были изначально ориентированы на решение задач, обычно присущих той или иной отрасли экономики, охране окружающей среды, ведению кадастров и т. п.

Дальнейшее усложнение модели пространственных данных и развитие набора функций позволило перевести некоторые из этих систем из разряда проблемно-ориентированных (узкоотраслевых) в класс универсальных ГИС. Общеизвестно, что универсальные ГИС в силу их полной функциональности и наличия средств адаптации к нуждам конкретных предприятий позволяют решать задачи (классы задач) в самых различных областях человеческой деятельности, где требуются обработка и анализ пространственных данных. Первыми универсальными ГИС считают новые версии уже упомянутых систем ArcInfo, ArcView и MapInfo, а также российские ГИС Indor GIS (ныне Indor Map) [23], «Карта 2003» [24] и т. д. Именно такие системы более 20 лет назад начали интенсивно внедряться и на предприятиях нефтегазовой отрасли, в основном для управления имуществом и решения задач оценки воздействия производства на окружающую среду. Следует отметить, что проблемы внедрения и эксплуатации ГИС, в первую очередь универсальных систем на предприятиях нефтегазовой отрасли, ставились и весьма продуктивно обсуждались в течение ряда лет на всероссийской научно-практической конференции «Геоинформатика в нефтегазовой отрасли», проводимой под эгидой ГИС-Ассоциации России [25, 26]. Существует секция ГИС-Ассоциации, работа которой посвящена использованию пространственных данных и ГИС в этой отрасли. Кроме того, компания Esri Inc. (США) совместно с ООО «Esri CIS» и ООО «Дата+» (Россия) ежегодно проводят научно-практический семинар по обмену опытом в области создания на основе своих универсальных ГИС проблемно-ориентированных систем и внедрения их на предприятиях нефтегазовой отрасли [27].

В последнее десятилетие дальнейшее развитие получили универсальные ГИС, имеющие мощный

функционал и средства разработки и поэтому названные ГИС-платформами [28–30]. Под ними понимаются современные универсальные ГИС, имеющие также программное обеспечение с высокой степенью адаптируемости к особенностям конкретных производств и предприятий. Возможность такой адаптации обусловлена современной архитектурой программного обеспечения, развитыми инструментальными средствами (обычно в виде интегрированной среды разработки), а также соответствующими методологиями внедрения и развития на основе той или иной платформы проблемно-ориентированных ГИС предприятий [31, 32].

Проведенный анализ рассмотренного выше перечня задач, которые необходимо решать с помощью ГИС на предприятиях нефтегазовой отрасли, позволил сформулировать ряд требований к универсальным ГИС для таких предприятий. Основные из них в виде перечня базовых характеристик и наборов функций ГИС приведены в таблице. В первую очередь была выявлена необходимость использования универсальных ГИС, поддерживающих векторную модель пространственных данных (первое требование). ГИС, имеющие именно такую базовую характеристику, называют векторными системами. ГИС с растровой моделью пространственных данных позволяют решать только некоторые из перечисленных выше задач предприятий и поэтому далее не анализируются. Более того, некоторые векторные универсальные ГИС имеют ряд функций для работы в рамках растровой модели. Кроме полного перечня наборов функций, присущих многим универсальным векторным ГИС (требования 2–9), необходимы функции, связанные с анализом двумерных геополей (требования 10, 11) [1]. Под геополем (поверхностью) в геоинформатике понимается большой класс пространственных объектов, главной особенностью которых является пространственная непрерывность, выражающаяся в том, что две близко расположенные точки поверхности скорее всего будут иметь и близкое значение геополя [1]. Такие объекты-поверхности обычно описывают в виде модели двумерных геополей, если они представляют собой поверхность, однозначно описываемые скалярной функцией от двух пространственных координат x и y . Модели геополей наиболее часто в нефтегазовой отрасли используются при обработке и интерпретации геолого-геофизических данных, в задачах, связанных с анализом рельефа местности и границ нефтяных и газовых резервуаров УВС, в экологическом моделировании и оценке ущерба при аварийных разливах нефти и т. п.

Другой перечень требований к ГИС формируется из необходимости обработки и визуализации на предприятии больших объемов атрибутивных и пространственных данных. Он содержит требования 12–14 к наличию средств для работы с внешними относительно ГИС системами управления базами данных (СУБД), средств 3D-визуализации и обмена данными с другими информационно-управляющими системами предприятия.

Наконец, под номерами 15 и 16 в таблице включены требования, связанные с необходимостью дальнейшего развития внедренных на предприятиях ГИС (наличие интегрированной среды разработки новых программных модулей, включая специализированные языки программирования, и наличие механизмов подключения внешних программных модулей и библиотек).

В результате анализа характеристик и функциональных возможностей большого числа современных универсальных векторных ГИС в качестве удовлетворяющих всем требованиям предприятий нефтегазовой отрасли были выбраны четыре ГИС-платформы (таблица).

Среди них ArcGIS 10.5 компании Esri Inc. [33], MapInfo Pro™ V. 16 компании Pitney Bowws (бывшая компания MapInfo Corp.) [29], ГИС «Панорама» 12 ЗАО «КБ «ПАНОРАМА» [34] и ГИС GET MAP компании Совзонд [35], созданная на основе концепции открытых ГИС и свободно распространяемой (Open Source) ГИС QGIS [36]. В ГИС-платформе «Панорама» 12 используется известная настольная ГИС «Карта 2011» [37].

Если первые две являются самими последними версиями универсальных ГИС известных зарубежных компаний, локализованных для русскоязычных пользователей, то последние две системы разработаны в России. Из таблицы следует, что требование 11 в первых трех ГИС-платформах реализуется с помощью дополнительных модулей, включаемых в платформы по мере необходимости; у

ГИС-платформы MapInfo Pro™ V. 16 они созданы сторонними компаниями. Отметим, что к этим ГИС-платформам примыкают еще две уникальные по функциональным возможностям российские ГИС Indor Map ООО «Индорсофт» [23] и ГИС GeoBuilder™ Quantum АО «Геокибернетика» [38]. Однако они не в полной мере удовлетворяют сформулированным требованиям и не имеют некоторых инструментальных средств разработки, что не позволило рекомендовать их в качестве базовых систем для предприятий нефтегазовой отрасли.

Анализ показывает, что лидером среди выбранных ГИС-платформ как по функциональности, так и по наличию гибкой архитектуры, безусловно, является платформа ArcGIS 10.5 [33]. По сути, сегодня платформа – это линейка взаимосвязанных продуктов семейства ArcGIS 10.5. В этой линейке особое место занимают настольные (Desktop) ГИС [30]. К ним относятся ArcGIS ArcView, ArcGIS ArcEditor и ArcGIS ArcInfo. Эти ГИС позволяют специалистам решать множество задач на локальных рабочих местах и на корпоративном уровне. В состав линейки также входят базовые приложения ArcMap (решение картографических задач), ArcToolbox (обработка пространственных данных) и ArcCataloge (доступ и управление пространственными данными в локальной вычислительной сети и через сеть Интернет). Кратко рассмотрим основные базовые продукты линейки.

ArcGIS ArcView – наиболее часто используемый базовый продукт семейства. Исторически, начи-

Таблица. Характеристики и функции ГИС-платформ
Table. Characteristics and functions of GIS-platforms

Требования Requirements	Платформа Platform				
	Характеристика или функции Characteristic or functions	ArcGIS 10.5	MapInfo Pro™ V. 16	GET MAP	ГИС «Панорама» 12 GIS «Panorama» 12
1	Модель пространственных данных The model of spatial data	Векторная топологическая, растровая Vector topological, raster	Векторная не-топологическая, растровая Vector non topological, raster	Векторная топологическая, дополнительно растровая Vector topological, optional raster	
2	Функции для работы с картами Functions for working with map	Да/Yes			
3	Работа с картографическими проекциями Work with cartographic projection				
4	Функции визуализации Visualizing functions	Векторных и растровых карт/Vector and raster maps			
5	Функции пространственного анализа Functions for spatial analysis	Да/Yes			
6	Графический редактор Graphics editor	Векторный, растровый/Vector, raster			
7	Используемая СУБД Type of DBMS	Собственная/Internal	Postgre SQL/ PostGIS	Postgre SQL	
8	Формирование атрибутивных и пространственных запросов Building attribute and spatial queries	SQL-запросы/SQL-queries			
9	Формирование отчетов Building reports	Да/Yes			

ная с версии ArcView 3.0, система позиционировалась как универсальная ГИС, сегодня в составе семейства ArcGIS 10.5 продолжает оставаться самой полнофункциональной ГИС с большим набором мощных инструментов для получения (ввода), визуализации, управления и анализа пространственных данных.

ArcGIS ArcEditor – сочетает функциональность ArcView с возможностями создания и моделирования баз пространственных данных. Имеет механизм поддержки целостности и многопользовательского редактирования таких баз данных, управления версиями и построения топологических и геометрических сетей.

ArcGIS ArcInfo – расширяет функциональность продуктов ArcView и ArcEditor набором мощных процедур для обработки и анализа пространственных данных.

В линейке имеются продукты для создания серверных компонент ГИС. Так, ArcGIS for Server предназначен для разработки корпоративных ГИС с неограниченным числом рабочих мест, причем клиентом для этого продукта может быть как настольное, так и веб-приложение. ArcIMS – продукт для публикации пространственных данных, в том числе в виде карт, в интранет (уровень предприятия)/Интернет с возможностью геокодирования, поиска и анализа данных. ArcSDE обеспечивает хранение пространственных данных в наиболее распространенных промышленных СУБД, являющихся внешними по отношению к создаваемым с помощью этой платформы ГИС. При этом для представления и хранения данных используется объектно-реляционная модель данных. ArcSDE обеспечивает также интеграцию продуктов платформы ArcGIS 10.5 с системами автоматизированного проектирования (САПР) и с другими ГИС, а также с рядом известных производственных информационных систем предприятий отрасли. Для разработчиков в составе платформы имеется продукт ArcGIS Engine – набор библиотек встраиваемых компонентов и инструментов для создания проблемно-ориентированных ГИС.

Отметим, что в состав платформы ArcGIS 10.5 входит широкий спектр дополнительных модулей для создания проблемно-ориентированных ГИС. Примерами таких модулей служат модули для работы с геополями, модули 3D-визуализации и т. п. [30].

Имеющиеся у каждой из рассмотренных платформ средства адаптации позволяют учитывать особенности предприятий отрасли и формировать для них соответствующие ГИС. В тех случаях, когда для решения некоторых прикладных задач от ГИС требуются дополнительные функции, отсутствующие у платформы, для реализации такой функциональности используются ее инструментальные средства. Они позволяют создавать ГИС-приложения. Под ГИС-приложением понимается совокупность программных модулей, расширяющих функциональные возможности универсаль-

ной ГИС и ориентированных на решение отдельной прикладной задачи, а иногда и определенного класса (перечня) задач предприятия. ГИС-приложения обычно создаются на специализированном макроязыке (макроязыках), интерпретатор которого встроен в интегрированную среду платформы.

Существует несколько методов создания проблемно-ориентированных ГИС на основе ГИС-платформы и концепции ГИС-приложений для нее. На наш взгляд, наиболее перспективным из них является метод создания инструментальных ГИС (иногда говорят ГИС-средств) [1]. Суть его в том, что за счет добавления к пользовательскому интерфейсу универсальной ГИС нового интерфейса, реализующего доступ к ГИС-приложениям, на основе ГИС-платформы создается не отдельная проблемно-ориентированная ГИС, а новая инструментальная ГИС. На рис. 1 показана обобщенная структура инструментальной ГИС, разработанной с помощью такого метода. Видно, что через интерфейс пользователя ГИС-приложений реализуется доступ к программным модулям (к дополнительным функциям) для решения задачи (задач), выполнение которой невозможно стандартными средствами универсальной ГИС. Более того, через этот же интерфейс возможен доступ пользователя к некоторым функциям ядра универсальной ГИС. Такая инструментальная ГИС после соответствующих настроек дополнительного интерфейса пользователя и требующихся ГИС-приложений позволяет сформировать несколько проблемно-ориентированных ГИС для решения одного и более классов прикладных задач.

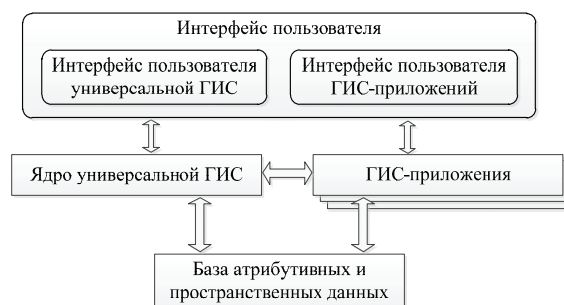


Рис. 1. Обобщенная структура инструментальной ГИС

Fig. 1. General structure of instrumental GIS

В качестве примера инструментальной ГИС, созданной на базе универсальной ГИС MapInfo Professional, можно привести ГИС SurfMapper 2.1 [1]. Она предназначена для анализа и визуализации двумерных геополей с использованием моделей геополей в виде регулярных и триангуляционных сетей. В свою очередь, ГИС SurfMapper 2.1 применялась для создания следующих проблемно-ориентированных ГИС: системы построения структурных карт и геологических разрезов на месторождениях УВС, системы для анализа качества подземных водных объектов, ГИС «Баланс-Гидродинамик» для подсчета запасов месторождений УВС, системы построения профилей нефтега-

зопроводов с учетом цифровой модели рельефа местности. Для разработки проблемно-ориентированных ГИС инструментальная ГИС SurfMapper 2.1 имеет собственную интегрированную среду разработки mb Studio 2.0.

Архитектура универсальных ГИС

Первые универсальные ГИС были настольного типа, когда на одном персональном компьютере установлены и программное обеспечение ГИС, включая ее СУБД, и база данных (БД). Следующим этапом развития архитектуры универсальных ГИС была файл-серверная архитектура [25]. При этом имеем «толстого» клиента в виде той же настольной универсальной ГИС на каждом из компьютеров локальной вычислительной сети и «тонкий» сервер в сети, в том смысле, что почти вся работа выполняется на стороне клиента, а от сервера требуется только достаточная емкость дисковой памяти для хранения файлов атрибутивных и пространственных данных. В этой архитектуре ГИС возможен многопользовательский режим работы, но с учетом довольно жестких требований поддержания целостного состояния и гарантированной надежности хранения информации в БД, которая является всего лишь набором файлов на сервере. Отметим, что все обращения к БД идут через СУБД универсальной ГИС клиента, которая инкапсулирует внутри себя все сведения о физической структуре БД. При запросе пользователя на данные СУБД инициирует обращение к данным на сервере, в результате чего часть файлов в БД копируется на клиентский компьютер и затем обрабатывается и анализируется.

Свободной от ряда недостатков файл-серверной архитектуры и более современной является клиент-серверная архитектура универсальных ГИС [39]. Двухзвенную (классическую) клиент-серверную архитектуру имеют многие универсальные ГИС. Для неё характерно то, что на клиентском компьютере лишь формируется запрос пользователем на данные и он отсылается на сервер баз данных. В оперативной памяти сервера функционирует централизованная СУБД, входящая в состав ГИС и обеспечивающая совместное использование клиентами БД (многопользовательский режим). СУБД обрабатывает запрос, и сервер в ответ на запрос передает клиенту только ту выборку из БД, которая удовлетворяет запросу пользователя. На клиентском компьютере ведется обработка и (или) анализ этой выборки данными средствами клиентской части ГИС. Анализ показывает, что классическая клиент-серверная архитектура ГИС наряду с большим числом достоинств имеет несколько недостатков, которые проистекают от использования клиентских компьютеров в качестве исполнителей бизнес-логики ГИС. Главный из недостатков – при любом изменении алгоритмов обработки и анализа атрибутивных или пространственных данных необходимо обновлять программное обеспечение ГИС на каждом клиентском компьютере сети.

Дальнейшим шагом в эволюции архитектур универсальных ГИС является трехзвенная (иногда говорят, трехуровневая) клиент-серверная архитектура [40, 41]. В этой архитектуре вся бизнес-логика ГИС, реализованная в случае двухзвенной архитектуры в клиенте, выносится и программно реализуется в виде отдельной компоненты ГИС, называемой сервером приложений. Тогда имеем три звена (уровня) архитектуры универсальной ГИС:

- клиент – это интерфейсный уровень ГИС, предоставляемый пользователю; такое звено не должно иметь прямых связей с БД (по требованиям безопасности и масштабируемости), а обращается только к серверу приложений;
- сервер приложений – второй уровень (звено), на нем сосредоточена бо́льшая часть бизнес-логики ГИС; серверы приложений создаются так, чтобы добавление к ним новых экземпляров таких же серверов обеспечивало горизонтальное масштабирование системы с целью повышения производительности программного обеспечения ГИС и не требовало внесения изменений в их программный код;
- сервер баз данных находится на третьем уровне и обеспечивает хранение атрибутивных и пространственных данных в виде БД, а также манипулирует этими данными с помощью входящей в его состав СУБД.

Итак, трехзвенная архитектура ГИС предполагает переход от «толстого» клиента, используемого при двухзвенной архитектуре, к «тонкому». При этом «толщина» такого клиента зависит от особенностей универсальной ГИС, в том числе от «объема» бизнес-логики, переносимой от клиента на сервер приложений. Самым «тонким» клиентом может служить обычный веб-браузер. В этом случае в состав сервера приложений входит веб-сервер. Например, сервер приложений, созданный на основе продуктов и технологий компании Microsoft, содержит веб-сервер IIS и средства ADO.NET [42] и ASP.NET [43].

В общем случае можно говорить о многозвенной клиент-серверной архитектуре универсальных ГИС. Причем возможно вертикальное и горизонтальное масштабирование клиентов и серверов. При горизонтальном масштабировании клиент или сервер могут содержать физически разделенные части логически однородного программного модуля, причем работа с каждой из частей может происходить независимо. Это делается для выравнивания загрузки при обработке больших объемов данных. Сегодня уже существуют примеры корпоративных информационных систем в нефтегазовой отрасли, имеющих многозвенную клиент-серверную архитектуру [44].

Отметим, что все выбранные выше для предприятий нефтегазовой отрасли ГИС-платформы позволяют создавать перспективные ГИС с двухзвенной и трехзвенной клиент-серверной архитектурой.

Корпоративные ГИС

Сегодня совершенствование системы управления любого предприятия нефтегазовой отрасли предполагает внедрение и развитие современных информационных систем и технологий. Известно, что магистральным путем развития информационных систем для многоуровневого управления такими предприятиями является создание комплексных информационных систем управления предприятием (часто говорят, корпоративных информационных систем управления – КИСУ) [4]. Такая КИСУ должна обеспечивать автоматизацию основных бизнес-процессов большинства служб предприятия и автоматизированное распределенное и многоуровневое управление даже крупномасштабным предприятием.

Авторы ряда работ [5, 40, 45, 46] считают перспективным направлением информатизации предприятий нефтегазовой отрасли создание КИСУ на основе современных универсальных ГИС. По сути дела, на предприятиях должны появиться корпоративные ГИС. Опираясь на приведенные выше результаты анализа большого перечня задач, которые необходимо решать на таких предприятиях с использованием ГИС, можно согласиться с этой идеей. Действительно, число таких задач уже сегодня велико и продолжает расти, а результаты их решения крайне необходимы многим специалистам и топ-менеджерам предприятий для принятия ими оптимальных управленческих решений. Более того, все большее число служб предприятий, в первую очередь производственных, нуждается в совместном использовании пространственных данных, результатов их обработки и анализа. Такую совместную работу проще организовать с использованием единой информационной среды типа корпоративной ГИС. Учтем также, что ГИС становится корпоративной, если её данные общедоступны в границах предприятия.

На наш взгляд, имеются два подхода к созданию КИСУ и, соответственно, корпоративных ГИС предприятий нефтегазовой отрасли. Первый предполагает, что ядром КИСУ служит одна из ГИС-платформ, приведенных в таблице, или векторная универсальная ГИС, имеющая интегрированную среду разработки. Используя интегрированную среду платформы и методологию разработки ГИС-приложений, можно создать программное обеспечение отсутствующих, но востребованных предприятием информационно-управляющих систем. Кроме того, средства платформы для взаимодействия с внешними СУБД и обмена данными с другими системами позволят интегрировать ядро такой КИСУ с существующими на предприятии информационно-управляющими системами, в том числе учетного типа. В итоге можно создать КИСУ предприятия в виде корпоративной, в широком смысле этого слова, ГИС.

Второй подход применим, если на предприятии уже имеется развитая информационно-управляющая система, играющая роль КИСУ. В качестве та-

кой системы может быть система класса ERP (Enterprise Resource Planning – планирование и управление всеми ресурсами предприятия) и (или) класса MES (Manufacturing Execution System – исполнительная система управления производством предприятия) [4, 47]. В этом случае на основе ГИС-платформы или векторной универсальной ГИС создается ГИС уровня предприятия, которая интегрируется с существующей КИСУ и с рядом других информационно-управляющих систем предприятия. Такая ГИС является корпоративной в узком смысле, поскольку она не является системообразующей и охватывает только те службы предприятия, которые ведут обработку и анализ пространственных данных.

При создании корпоративной ГИС с использованием любого из этих подходов возникает серьезная проблема [46]. Она заключается в том, что теоретически правильная идея использования единой базы пространственных данных такой ГИС не может быть практически реализована, поскольку в первую очередь противоречит требованиям информационной безопасности предприятия. Более того, специалисты различных служб актуализируют свои тематические базы пространственных данных по своим регламентам и с различной скоростью, периодически меняют структуры данных. Для решения этой проблемы предлагается следующий способ. Разбить единую базу пространственных данных корпоративной ГИС на две, причем БД первого типа содержит базовые тематические данные (гидрография, рельеф местности и т. п.), которые находятся в неизменном виде длительное время и доступны всем заинтересованным службам предприятия. БД второго типа содержит специальные тематические пространственные данные, причем каждой службе доступен для внесения/редактирования этих данных только ее компонент БД. Доступ к компоненту без его редактирования могут иметь специалисты других служб. Более того, в БД второго типа предлагается хранить наряду с пространственными данными конкретного объекта укороченный набор его атрибутивных данных, включая ключи, наименование объекта и т. п. По этим атрибутивным данным налаживается связь ядра корпоративной ГИС с клиентом или с внешней информационно-управляющей системой, с которой работает соответствующая служба предприятия. Специалисты этой службы могут наполнять и редактировать пространственную и атрибутивную БД информационно-управляющей системы. Если наполнение или редактирование проведено, то пространственные и атрибутивные данные укороченного набора реплицируются и в актуальном виде появляются в соответствующем месте БД второго типа корпоративной ГИС. Кроме того, специалисты этой службы могут с помощью ГИС-приложений, установленных на их компьютерах и реализующих пользовательский интерфейс ГИС, формировать свои пространственные запросы. Эти запросы обрабаты-

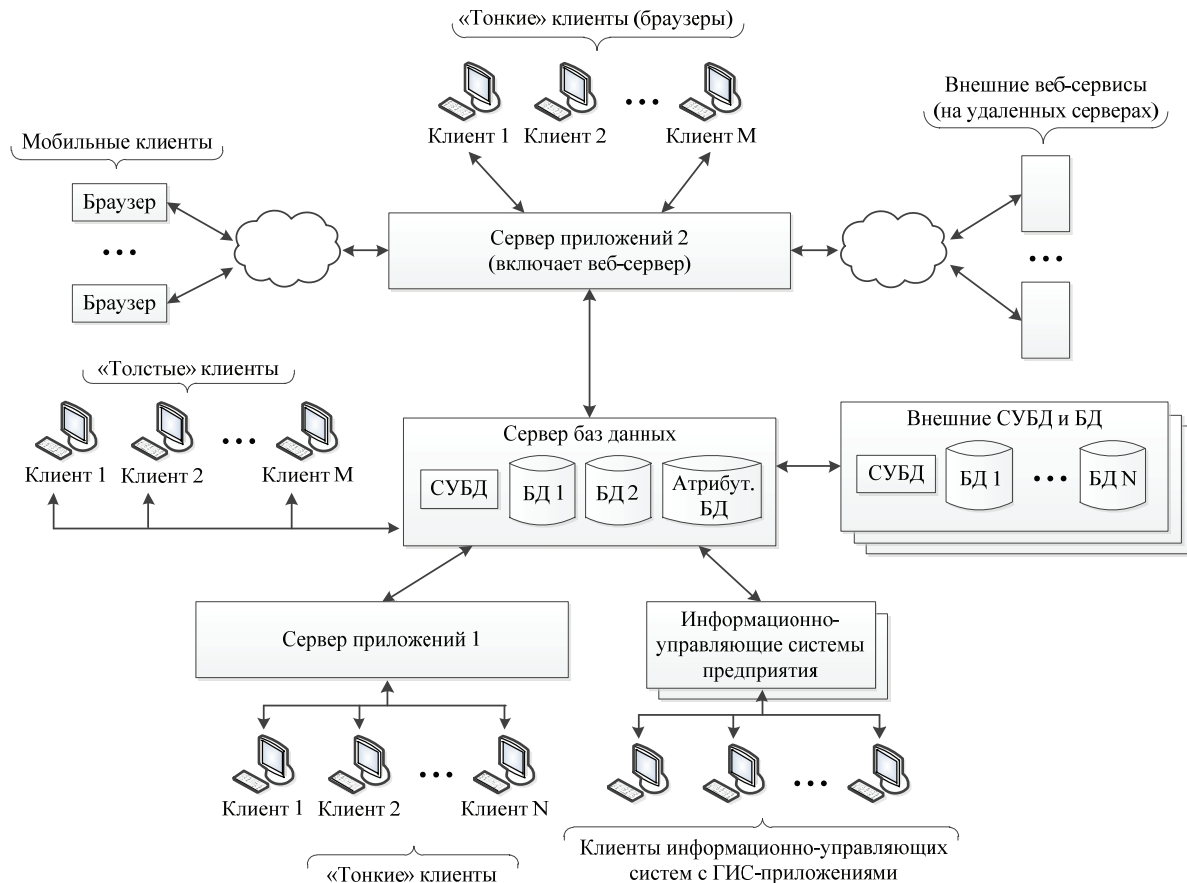


Рис. 2. Концептуальная архитектура корпоративной ГИС

Fig. 2. Conceptual architecture of enterprise GIS

ются СУБД корпоративной ГИС, данные извлекаются из её БД первого и второго типа и анализируются. Результаты анализа возвращаются пользователям. Если ГИС-приложения тесно интегрированы с информационно-управляющей системой службы, то это позволяет считать её, по сути дела, некоторой подсистемой корпоративной ГИС.

Учитывая изложенное выше, можно предложить концептуальную (обобщенную) архитектуру корпоративной ГИС (рис. 2). Она может быть адаптирована и детализирована в случае конкретного предприятия отрасли.

Приведенная на рис. 2 концептуальная архитектура больше присуща корпоративной ГИС в узком смысле, поскольку совокупность информационно-управляющих систем предприятия, интегрированная с ней, создается не на основе этой ГИС, и только некоторые из таких систем имеют в составе прикладного программного обеспечения ГИС-приложения для формирования пространственных запросов к серверу баз данных корпоративной ГИС. Среди таких информационно-управляющих систем может быть и КИСУ предприятия.

Предложенная архитектура является комбинацией традиционных двухзвенной и трехзвенной клиент-серверных архитектур ГИС, и в её составе имеются два сервера приложений (горизонтальное

масштабирование). Все это обусловлено тем, что специалистами служб и топ-менеджерами современного предприятия востребован самый различный функционал корпоративной ГИС и, соответственно, используются «толстые» и «тонкие» клиенты, а также «тонкие» и мобильные клиенты в виде веб-браузеров. Более того, «толстые» клиенты взаимодействуют с сервером баз данных напрямую (двухзвенная архитектура), а для «тонких» и мобильных клиентов необходим еще второй сервер – сервер приложений (на рис. 2 таких серверов два). «Тонкие» и мобильные клиенты в виде веб-браузеров взаимодействуют с сервером баз данных через сервер приложений 2, который обязательно содержит веб-сервер. Такие клиенты могут использовать через этот сервер приложений внешние веб-сервисы, находящиеся на удаленных веб-серверах и не обязательно принадлежащих предприятию. Отметим, что сегодня в разных отраслях, в том числе нефтегазовой, используются проблемно-ориентированные ГИС, позволяющие решать определенные задачи с применением «тонких» клиентов в виде веб-браузеров. Такие системы получили название веб-ГИС [45]. На наш взгляд, существует тенденция в развитии корпоративных ГИС, когда «тонкие» клиенты таких систем будут представлены только в виде веб-браузеров.

Сервер баз данных включает СУБД корпоративной ГИС и, в соответствии с предложенным способом, базу пространственных данных первого типа (БД1), и базу пространственных данных второго типа (БД2), а также базу атрибутивных данных пространственных объектов предприятия. Сервер баз данных может получать атрибутивные и пространственные данные из внешних БД, взаимодействуя с внешними СУБД.

По нашему мнению, основные технические решения и компоненты предложенной архитектуры корпоративной ГИС в узком смысле могут быть использованы при разработке архитектуры корпоративной ГИС в широком смысле, когда универсальная ГИС или ГИС-платформа будут являться ядром информационного пространства предприятия и выполнять роль КИСУ.

Анализ результатов внедрения корпоративных ГИС на предприятиях нефтегазовой отрасли России показывает, что все они являются корпоративными системами в узком смысле [47, 48]. Причем эти ГИС отличаются друг от друга уровнем автоматизации бизнес-процессов, при выполнении которых обрабатываются и анализируются пространственные данные, используемыми архитектурными решениями и т. д. На сегодняшний день известно, что только в НК «Роснефть» ведутся проектные работы по созданию корпоративной ГИС в широком смысле.

Многие предприятия нефтегазовой отрасли сегодня уже накопили большие объемы атрибутивных и пространственных данных об объектах своей деятельности. Они хранят в себе потенциальные возможности по извлечению полезной аналитической информации, на основе которой можно выявлять скрытые тенденции, делать прогнозы, искать новые технические решения и т. д. [9, 10, 47]. Поэтому в рамках концепции корпоративных ГИС можно отметить два перспективных направления их развития. Первое из них – создание и использование в таких ГИС хранилищ данных (англ. Data Warehouse – DW) [49] и методов оперативной аналитической обработки данных (англ. On-Line Analytical Processing – OLAP) [50]. Причем в хранилище данных размещаются и подвергаются OLAP-обработке не только атрибутивные, но и пространственные данные. Второе из перспективных направлений – развитие методов интеллектуального анализа пространственных данных (англ. Data Mining или Business Intelligence – BI) с целью выявления скрытых закономерностей по данным из хранилищ данных ГИС. Затем эти методы программно реализуются в среде корпоративной ГИС и используются как новые функции пространственного анализа [51].

На наш взгляд, имеется ещё одно перспективное направление развития корпоративных систем. Из приведенного выше анализа классов задач, решаемых на предприятиях нефтегазовой отрасли с использованием пространственных данных, следует, что многие из них должны решаться с примене-

нием актуальных (периодически обновляемых) пространственных данных, получаемых в результате мониторинга состояния производственных объектов и окружающей такие объекты природной среды. Это означает, что предприятиям необходимо периодически собирать и обновлять в БД своих корпоративных ГИС пространственные данные. Поскольку это является весьма трудоемкой задачей, то предприятиям выгодно получать актуальные пространственные данные от сторонних организаций, оказывающих такие услуги. Подобной организацией может стать, например, ОАО «Газпром космические системы», имеющая собственную инфраструктуру и уже сегодня ведущая аэрокосмический мониторинг некоторых производственных объектов ряда предприятий ПАО «Газпром». Этой организацией реализуется проект по созданию мощной системы дистанционного зондирования Земли (по сути корпоративной ГИС) «СМОТР». Система позволит проводить аэрокосмический мониторинг производственных объектов и территорий предприятий ПАО «Газпром» с использованием собственных космических аппаратов и БПЛА в инфракрасном, оптическом и миллиметровом диапазонах длин волн [52].

С целью оказания геоинформационных услуг предприятиям нефтегазовой отрасли ОАО «Газпром космические системы» необходимо разрабатывать такое перспективное направление, как интеграция собственной корпоративной ГИС «СМОТР» с корпоративными ГИС предприятий, нуждающихся в актуальных пространственных данных. При решении проблемы интеграции систем можно использовать подходы и методы, изложенные в работе [53].

Корпоративная геоинформационная система управления «Магистраль-Восток»

В качестве примера корпоративной ГИС в узком смысле рассмотрим корпоративную геоинформационную систему управления (КГСУ) нефтегазодобывающим производством, созданную в Институте кибернетики Томского политехнического университета и получившую название «Магистраль-Восток» [4, 47].

КГСУ «Магистраль-Восток» является, во-первых, системой класса MES и, поскольку автоматизирует большинство производственных бизнес-процессов и охватывает все производственные службы нефтегазодобывающего предприятия, по сути, является КИСУ. Во-вторых, эта система является корпоративной ГИС из-за большого числа специалистов из разных служб, имеющих с её помощью возможность обрабатывать и анализировать пространственные данные.

КГСУ «Магистраль-Восток» имеет двухзвенную клиент-серверную архитектуру (рис. 3). Отличительной особенностью архитектуры этой системы является наличие кроме сервера баз данных, установленного в центральном офисе предприятия, на каждом из промыслов своего сервера баз

данных, т. е. имеет место горизонтальное масштабирование серверов. Все сервера баз данных имеют в своем составе СУБД Microsoft SQL Server 2008 [54], базу атрибутивных данных БД_{АТ} (технологические данные, паспортные данные технологических объектов, данные планирования и исполнения планов и т. п.) и базу пространственных данных (карты, координаты технологических объектов, масштабные и немасштабные технологические схемы) БД_{ПР}. Сервера на промыслах периодически получают по протоколу OPC технологические данные от различных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), позволяющих управлять технологическими процессами на установках подготовки нефти и газа, на кустах скважин и т. п. Число АСУ ТП,

поставляющих данные в сервер на промысле, может быть различным, что и показано на рис. 3. Паспортные данные технологических объектов, плановая и оперативная технологическая информация и т. д. заносятся в БД_{АТ} специалистами соответствующих служб. Сервер баз данных центрального офиса может взаимодействовать с внешними СУБД и БД. Для обмена данными между серверами используются механизмы репликаций, реализованные на основе СУБД Microsoft SQL Server 2008 с использованием оригинальных алгоритмов. Для транспорта каждого вида данных используется свой вид репликаций [47, 53]. Репликации данных между серверами позволяют поддерживать распределенную производственную БД предприятия.

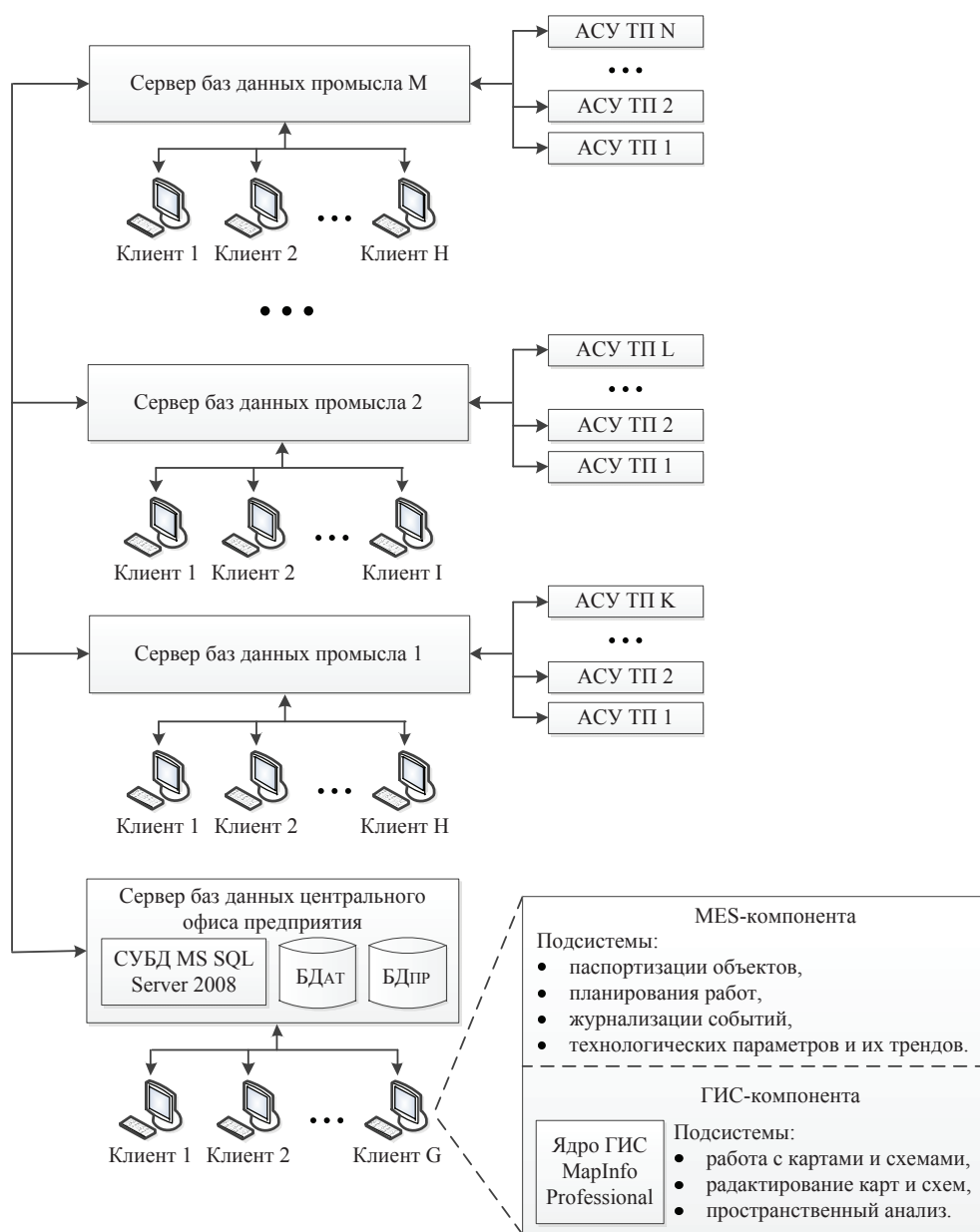


Рис. 3. Архитектура КГСУ «Магистраль-Восток»

Fig. 3. Architecture of Enterprise Geoinformation Management System «Magistral-Vostok»

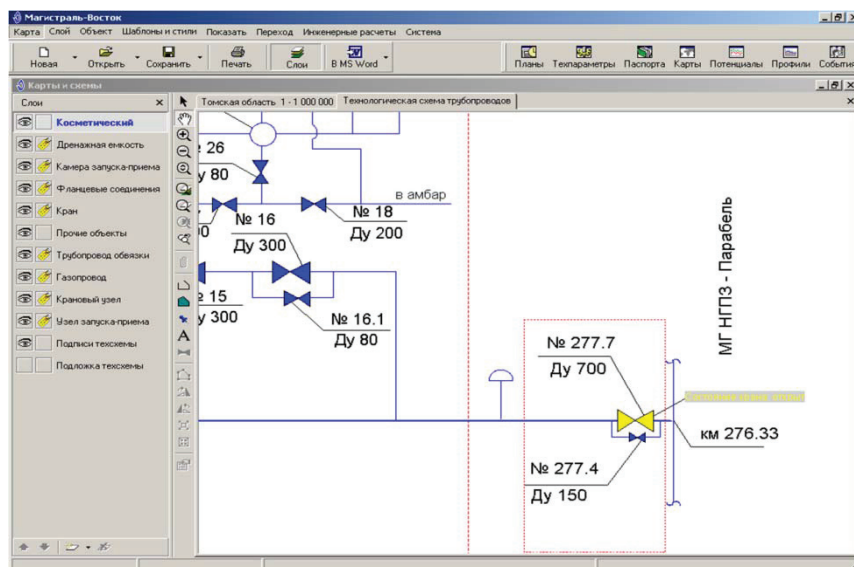


Рис. 4. Пользовательский интерфейс подсистемы редактирования технологических схем

Fig. 4. User interface of subsystem for technological schemata editing

Каждый из серверов баз данных обеспечивает многопользовательский режим работы принадлежащей ему группы клиентов. Все клиенты КГСУ «Магистраль-Восток» настраиваются с учетом требований конкретных специалистов и топ-менеджеров и поэтому имеют разное число используемых ими в работе программных подсистем, т. е. используются клиенты разной «толщины» [55]. На рис. 3 более подробно в качестве примера приведен перечень подсистем клиента G сервера баз данных центрального офиса. Видно, что всё программное обеспечение этого клиента разбито на две части: MES-компонента и ГИС-компонента. В каждую из частей входит определенное число программных подсистем (модулей). ГИС-компонента имеется только у тех клиентов, которые с её помощью ведут обработку и анализ пространственных данных. В качестве ядра ГИС-компоненты используется ядро универсальной векторной ГИС MapInfo Professional 8 компании MapInfo Corp. (США) [20]. В последней версии КГСУ «Магистраль-Восток» ядром ГИС-компоненты служит библиотека MapInfo MapX этой же компании [56]. В последней версии КГСУ также реализован описанный выше способ, в соответствии с которым БД_{пр} сервера баз данных разбивается на две базы пространственных данных: БД_{пр1} и БД_{пр2}. Последняя содержит кроме часто редактируемых специалистами пространственных данных укороченные наборы атрибутивных данных о тех же пространственных объектах. Для хранения и редактирования таких данных ряд клиентов имеют собственные локальные БД и соответствующее программное обеспечение. Редактированные данные реплицируются затем из локальных БД клиентов в БД_{пр2} соответствующего сервера баз данных. На рис. 4 в качестве примера показан инструмент для редактирования таких данных, установленный на клиентских компьютерах.

КГСУ «Магистраль-Восток» в настоящее время успешно внедрена на ряде предприятий нефтегазовой отрасли [47]. При этом большое число специалистов различных производственных и имущественных служб предприятий на своих клиентских местах наряду с MES-компонентой используют и ГИС-компоненту.

Выводы

1. Анализ основных бизнес-процессов, выполняющихся на предприятиях нефтегазовой отрасли, показал, что существует большое число классов задач, которые необходимо решать с помощью ГИС. На сегодняшний день имеется ряд универсальных ГИС, уже используемых при решении отдельных задач отрасли.
2. Проведенный анализ векторных универсальных ГИС позволил выделить среди них четыре ГИС-платформы, удовлетворяющих всем требованиям к характеристикам и функциональным возможностям со стороны предприятий и позволяющих создавать проблемно-ориентированные ГИС для решения различных классов задач отрасли. Рассмотрены перспективные архитектуры универсальных ГИС.
3. Показано, что перспективным направлением в развитии ГИС для предприятий нефтегазовой отрасли является создание корпоративных систем. В рамках концепции корпоративных ГИС выявлены два подхода к созданию таких систем и предложен способ организации пространственных баз данных, позволяющий решить проблему ведения единой базы пространственных данных.
4. Разработана концептуальная архитектура корпоративной ГИС в узком смысле, являющаяся комбинацией двухзвенной и трехзвенной клиент-серверных архитектур.

5. Предложены перспективные направления развития корпоративных ГИС. Первое из них связано с созданием в структуре таких ГИС хранилищ пространственных и атрибутивных данных и с развитием методов OLAP-обработки таких данных. Второе направление – развитие интеллектуальных методов и средств анализа пространственных данных. Третьим направлением является интеграция корпоративных ГИС с системой аэрокосмического мониторинга «СМОТР».
6. Показана архитектура и основные функциональные возможности корпоративной геоинформационной системы «Магистраль-Восток» для управления производством нефтегазодобывающих предприятий. В качестве ядра ГИС-компоненты клиентов системы используется ядро универсальной векторной ГИС MapInfo Professional 8 или библиотека MapInfo MapX.
Исследования поддержаны грантом по Программе повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета, проект № ВИУ-ИК-110/2017.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковин Р.В., Марков Н.Г. Геоинформационные технологии для анализа двумерных геополей. – Томск: Изд-во Томского университета, 2006. – 166 с.
2. Roxar Software Releases. RMS Tempest. URL: <http://www.emerson.com/en-us/automation/roxar> (дата обращения: 12.05.2017).
3. Petrel E&P Software Platform. URL: <http://www.software.slb.com/products/petrel/> (дата обращения: 11.05.2017).
4. Марков Н.Г. Информационно-управляющие системы для газодобывающего производства. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 261 с.
5. Чернявская Т.А. Место геоинформационной системы в информационном пространстве нефтегазодобывающей компании // ArcReview. – 2011. – № 1. – С. 1–3.
6. Еремин Н.А., Дмитриевский А.Н., Тихомиров Л.И. Настоящее и будущее интеллектуальных месторождений // Нефть. Газ. Новации. – 2015. – № 12 (183). – С. 46–51.
7. Решетников И.С. Автоматизация производственной деятельности газотранспортной компании. – М.: Изд-во Нефтегазсофтсервис, 2011. – 116 с.
8. Korovin I.S., Tkachenko M.G., Intelligent Oilfield Model // Procedia Computer Science. – 2016. – V. 101. – P. 300–303.
9. Jia A., Guo J. Key Technologies and Understanding on the Construction of Smart Fields // Petroleum Exploration and Development. – 2012. – V. 39. – P. 127–131.
10. Bogdan S., Kudinov A., Markov N. Manufacturing Execution Intellectualization: Oil and Gas Implementation Sample // Lecture № 2 in Computer Science: Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatic. – 2011. – № 8. – P. 73–79.
11. Полищук Ю.М., Токарева О.С. Использование космических снимков для экологической оценки воздействия факельного сжигания попутного газа на нефтяных месторождениях Сибири // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27. – № 7. – С. 647–651.
12. Remediation of the damaged environment of oil-producing areas / L.K. Altunina, L.I. Svazovskaya, Yu.M. Polishchuk, O.S. Tokareva // Petroleum Chemistry. – 2011. – V. 51. – № 5. – P. 381–385.
13. The application of satellite methods for monitoring snow dump sites / O.A. Pasko, O.S. Tokareva, N.S. Ushakova, E.S. Makartseva, E.A. Gaponov // Sovremennye Problemy Distansionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. – 2016. – V. 13. – Iss. 4. – P. 20–28.
14. Kovalev A., Tokareva O. Using modis NDVI products for vegetation state monitoring on the oil production territory in Western Siberia // Matec Web of Conferences. – 2016. – V. 48. – № 05003. – P. 1–5.
15. UAVSAR: new NASA airborne SAR System for research / P.A. Rosen, S. Hensley, K. Wheeler, G. Sadowy // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 2007. – V. 22. – Iss. 11. – P. 21–28.
16. Оптимизация трассы морского трубопровода при кластерном освоении месторождений Баренцева и Карского морей с архипелага Новая Земля / Я.О. Ефимов, А.Б. Золотухин, У.Т. Гуд-местад, К.А. Корнишин // Труды РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2015. – № 1 (278). – С. 19–22.
17. Информационные системы экологического мониторинга на базе ГИС в деле освоения шельфовых месторождений / А.П. Поздняков, А.В. Мещеряков, С.В. Ракунов, К.М. Сапрыкина // Нефть, газ и бизнес. – 2015. – № 1 (278). – С. 26–42.
18. Даниленко А. ГИС в нефтегазовой отрасли. URL: <http://neftegaz.ru/science/view/156-GIS-v-neftegazovoy-otrasli> (дата обращения: 17.05.2017).
19. Кошкарёв А.В., Тикунов В.С. Геоинформатика. – М.: Картцентр-Геоиздат, 1993. – 213 с.
20. MapInfo Professional is a desktop geographic information system software. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/MapInfo-Professional> (дата обращения: 17.05.2017).
21. Использование разработок Центра геоинформационных исследований ИГ РАН в нефтегазовой отрасли / А.В. Григорьев, Н.Н. Казанцев, С.Р. Мельников, С.В. Хрупов // Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. – 1998. – 2 (14). – С. 18–20.
22. ГИС Карта – многофункциональная географическая информационная система. URL: <http://chem-otkrit.ru/soft/GIS-Karta> (дата обращения: 18.05.2017).
23. Indor Map: универсальная геоинформационная система. URL: <http://www.indorsoft.ru/products/map/> (дата обращения: 17.05.2017).
24. Фадеев А.Н., Зимина О.А. Применение ГИС «Карта 2003» в лесном хозяйстве // Геопрофи. – 2006. – № 6. – С. 25–27.
25. Географические информационные системы в нефтегазовой промышленности. – Тюмень: изд-во СибНац. – 2002. – 324 с. URL: <http://www.geokniga.org/books/5287> (дата обращения: 11.05.2017).
26. Всероссийские научно-практические конференции «Геоинформатика» в нефтегазовой отрасли. Геоинформационный портал ГИС-Ассоциации. URL: <http://www.gisa.ru/conf.html> (дата обращения: 12.05.2017).
27. ГИС-технологии Esri в нефтегазовой отрасли. URL: <https://www.dataplus.ru/events/klyazma-2017/> (дата обращения: 17.05.2017).
28. ArcGIS Platform. URL: <http://esri.com/arcgis/about-arcgis> (дата обращения: 16.05.2017).
29. MapInfo Pro™ – Desktop GIS. URL: <http://www.pitney-bowes.com/us/location-intelligence/geographic-information-systems/mapinfo-pro.html> (дата обращения: 17.05.2017).
30. Настольные ГИС компании Esri. URL: <https://www.esri.com/products/arcgis-for-desktop/detail/key-features/> (дата обращения: 16.05.2017).
31. App Studio for ArcGIS. URL: <http://www.esri.com/landing-pages/appstudio> (дата обращения: 16.05.2017).
32. MapInfo Pro – мировой лидер на рынке ГИС и картографических приложений. URL: <http://mapinfo.ru/product/mapinfo-professional> (дата обращения: 17.05.2017).

33. ArcGIS 10.5 includes the latest release of Esri enterprise GIS. URL: <http://www.esri.com/arcgis/whats-new> (дата обращения: 17.05.2017).
34. Профессиональная ГИС «Панорама» 12. URL: http://gisinfo.ru/products/map12_prof.htm (дата обращения: 18.05.2017).
35. Ялдычина Н.Б. ГЕТМАР – новое решение для создания веб-ГИС // Геоматика. – 2015. – № 4. – С. 25–31.
36. QGIS is a free, open source, cross platform GIS. URL: <http://github.com/qgis/QGIS> (дата обращения: 19.05.2017).
37. Профессиональная ГИС «Карта 2011». URL: <http://innovater.com/software/874> (дата обращения: 19.05.2017).
38. Геоинформационная система Geobuilder™ Quantum. URL: <http://geobuilder.ru/produkty/geobuilder-quantum> (дата обращения: 19.05.2017).
39. Andrianov V.Yu. GIS and GPS in the Oil&Gas Industry // Rogtec. – 2014. – № 10. – P. 20–31. URL: http://rogtecmagazine.com/wp-content/uploads/2014/10/5_GISGPS.pdf (дата обращения: 19.05.2017).
40. Бакланов А.В. Корпоративные геоинформационные системы. – М.: Изд-во Дата+, 2011. – 207 с.
41. Касьянова Е.Л., Кикин П.М. Мобильные ГИС в нефтегазовой отрасли // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. – 2011. – № 1 (14). – С. 81–86.
42. ADO.NET Overview. URL: [https://msdn.microsoft.com/en-us/library/e80y5yhx\(v=vs.80\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/e80y5yhx(v=vs.80).aspx) (дата обращения: 19.05.2017).
43. Halvorsen Hans-Petter ASP.NET and Web Programming. URL: http://home.hit.no/~hansha/documents/microsoft.net/tutorials/asp_net_web_programming/ASP.NET%20and%20Web%20Programming.pdf (дата обращения: 20.05.2017).
44. Зыков С.В. Технология интеграции данных в гетерогенных корпоративных программных комплексах: дис.... д-ра техн. наук. – М., 2017. – 466 с.
45. Андрианов В.Ю., Щербина С.В. Корпоративные ГИС для всех и для каждого // ArcReview. – 2013. – № 1 (64). – С. 1–3.
46. Бакланов А.В. Корпоративная ГИС. Игра по правилам // ArcReview. – 2013. – № 1 (64). – С. 3–4.
47. Кудинов А.В., Марков Н.Г. Проблемы автоматизации производства газодобывающих компаний. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 247 с.
48. Шаев А., Миронов П., Лебеденко О. Концепция построения корпоративной геоинформационной системы в ОАО «НК «Роснефть» // ArcReview. – 2005. – № 1 (32). – С. 6–8.
49. Бакланов А.В. Мировой опыт создания корпоративных систем хранения данных в нефтегазовой отрасли // ArcReview. – 2017. – № 2 (81). – С. 4–6.
50. Overview of Online Analytical Processing (OLAP). URL: <https://support.office.com/en-us/article/Overview-of-Online-Analytical-Processing-OLAP-15d2cdde-f70b-4277-b009-ed732b75fdd6> (дата обращения: 19.05.2017).
51. Esri Maps for IBM Cognos. URL: <http://www.esri.com/landing-pages/ibm> (дата обращения: 20.05.2017).
52. Программа развития компании ОАО «Газпром космические системы». Система «СМОТР». URL: http://www.gazprom-spacesystems.ru/new_pro (дата обращения: 22.05.2017).
53. Veyber V., Kudinov A., Markov N. Model driven approach for oil&gas information systems and application integration // Proceedings of the 6th Central and Eastern European Software Engineering Conference, CEE-SECR2010. – Moscow, 2010. – P. 17–22.
54. Microsoft SQL Server 2008 R2. URL: <http://www.microsoft.com/ru-ru/download/details.aspx?id=44271> (дата обращения: 18.05.2017).
55. Bogdan S., Kudinov A., Markov N. Example of implementation of MES «Magistral-Vostok» for oil and gas production enterprise // Proceedings of the 5th Central and Eastern European Software Engineering Conference in Russia, CEE-SECR 2009. – Moscow, 2009. – P. 39–43.
56. MapInfo MapX – быстрый способ встроить ГИС-функции в приложения. URL: <http://www.mapinfo.ru/product/mapinfo-marx> (дата обращения: 22.05.2017).

Поступила 26.06.2017 г.

Информация об авторах

Марков Н.Г., доктор технических наук, профессор кафедры информационных систем и технологий Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 004.67:910.27 (075.8)

GEOINFORMATION SYSTEMS FOR OIL AND GAS ENTERPRISES: FUNCTIONALITY, ARCHITECTURE AND DEVELOPMENT PROSPECTS

Nikolay G. Markov,

markovng@tpu.ru

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

The necessity of manufacturing intellectualization in oil and gas enterprises based on the most modern methods of data processing and analysis, information and telecommunication technologies defines the relevance of the research. In particular, geoinformation systems (GIS) have especial significance nowadays. GIS allow processing and analyzing not only attributive but spatial data related to manufacturing objects of extracting and transporting hydrocarbon crude enterprises.

The main aim of the study is to analyze the functionality and architecture of modern general GIS to assess conformance to the requirements of oil and gas enterprises and to identify development prospects for such systems.

The methods used in the study: system analysis of general GIS and GIS-platforms based on requirements for their characteristics and functionality that were defined according to the list of necessary classes of tasks for oil and gas branch; methods to analyze architectures of information systems for different applications.

Results. The article shows that oil and gas enterprises have a large number of classes of tasks which could be solved by using GIS. The authors have analyzed the compatibility of general vector GIS with the requirements of oil and gas enterprises and made a conclusion that 4 GIS-platforms meet these requirements and could be used as a base for problem-oriented GIS to solve various classes of tasks for oil and gas branch. Various architectures of general GIS were analyzed and according to these results the conceptual architecture for enterprise GIS in a narrow sense was developed as well as the approach for spatial data bases organization. The authors proposed the prospects for such enterprise GIS within this architecture. The architecture was developed and functions were described for enterprise GIS «Magistral-Vostok» to manage manufacturing of oil and gas enterprises.

Key words:

Oil and gas enterprises, spatial data, general geoinformation systems, enterprise geoinformation systems.

The research was supported by the grant of the Competitiveness Enhancement Program of Tomsk Polytechnic University, project no. ВИУ-ИК-110/2017.

REFERENCES

1. Kovin R.V., Markov N.G. *Geoinformatsionnye tekhnologii dlya analiza dvumernykh geopolyev* [Geoinformation technologies for analysis of two-dimensional geofields]. Tomsk, Tomsk university Publ., 2006. 166 p.
2. *Roxar Software Releases. RMS Tempest*. Available at: <http://www.emerson.com/en-us/automation/roxar> (accessed 12 May 2017).
3. *Petrel E&P Software Platform*. Available at: <http://www.software.slb.com/products/petrel/> (accessed 11 May 2017).
4. Markov N.G. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy dlya gazodobyvayushchego proizvodstva* [Information management systems for gas production industry]. Tomsk, Tomsk polytechnic university Publ. house, 2016. 261 p.
5. Chernyavskaya T.A. Mesto geoinformatsionnoy sistemy v informatsionnom prostranstve neftegazodobyvayushchey kompanii [The position of geographic information system in the information space of oil and gas enterprise]. *ArcReview*, 2011, no. 1, pp. 1–3.
6. Eremin N.A., Dmitrievskiy A.N., Tikhomirov L.I. Nastoyashchee i budushchee intellektualnykh mestorozhdeniy [The present and the future of intelligent oilfields]. *Neft. Gaz. Novatsii*, 2015, no. 12 (183), pp. 46–51.
7. Reshetnikov I.S. *Avtomatizatsiya proizvodstvennoy deyatel'nosti gazotransportnoy kompanii* [Automation of production activities for a gas transportation company]. Moscow, Neftegazsoftservis Publ., 2011. 116 p.
8. Korovin I.S., Tkachenko M.G. Intelligent Oilfield Model. *Procedia Computer Science*, 2016, vol. 101, pp. 300–303.
9. Jia A., Guo J. Key Technologies and Understanding on the Construction of Smart Fields. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, vol. 39, pp. 127–131.
10. Bogdan S., Kudinov A., Markov N. Manufacturing Execution Intellectualization: Oil and Gas Implementation Sample. *Lecture № 2 in Computer Science: Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatic*, 2011, no. 8, pp. 73–79.
11. Polishchuk Yu.M., Tokareva O.S. Application of satellite images to ecological estimation of the impact of associated gas flaring on Siberian oil fields. *Optika atmosfery i okeana*, 2014, vol. 27, no. 7, pp. 647–651. In Rus.
12. Altunina L.K., Svazovskaya L.I., Polishchuk Yu.M., Tokareva O.S. Remediation of the damaged environment of oil-producing areas. *Petroleum Chemistry*, 2011, vol. 51, no. 5, pp. 381–385.
13. Pasko O.A., Tokareva O.S., Ushakova N.S., Makartseva E.S., Gaponov E.A. The application of satellite methods for monitoring snow dump sites. *Sovremennyye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2016, vol. 13, Iss. 4, pp. 20–28. In Rus.
14. Kovalev A., Tokareva O. Using modis NDVI products for vegetation state monitoring on the oil production territory in Western Siberia. *Matec Web of Conferences*, 2016, vol. 48, no. 05003, pp. 1–5.
15. Rosen P.A., Hensley S., Wheeler K., Sadowy G. UAVSAR: new NASA airborne SAR System for research. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2007, vol. 22, Iss. 11, pp. 21–28.
16. Efimov Ya.O., Zolotukhin A.B., Gudmestad U.T., Kornishin K.A. Optimizatsiya trassy morskogo truboprovoda pri klaster-nom osvoenii mestorozhdeniy Barentseva i Karskogo morey s arkhipelaga Novaya Zemlya [Optimization of the marine pipeline route during the cluster development of oil fields of the Barents Sea and the Kara Sea from the archipelago Novaya Zemlya]. *Trudy RGU nefti i gaza imeni I.M. Gubkina*, 2015, no. 1 (278), pp. 19–22.

17. Pozdnyakov A.P., Meshcheryakov A.V., Rakunov S.V., Saprykina K.M. Informatsionnye sistemy ekologicheskogo monitoringa na baze GIS v dele osvoeniya shelfovykh mestorozhdeniy [Application of information systems for ecological monitoring based on GIS for shelf fields development]. *Neft, gaz i biznes*, 2015, no. 1 (278), pp. 26–42.
18. Danilenko A. GIS v neftegazovoy otrasli [GIS for oil and gas industry]. Available at: <http://neftegaz.ru/science/view/156-GIS-v-neftegazovoy-otrasli> (accessed 17 May 2017).
19. Koshkarev A.V., Tikunov V.S. *Geoinformatika* [Geoinformatics]. Moscow, Karttsentr-Geoizdat Publ., 1993. 213 p.
20. *MapInfo Professional is a desktop geographic information system software*. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/MapInfo-Professional> (accessed 17 May 2017).
21. Grigorev A.V., Kazantsev N.N., Melnikov S.R., Khrupov S.V. Ispolzovanie razrabotok Tsentra geoinformatsionnykh issledovaniy IG RAN v neftegazovoy otrasli [Application of solutions of the Center of geoinformational researches IG RAS for oil and gas industry]. *Informatsionnyy byulleten GIS-Assotsiatsii*, 1998, no. 2 (14), pp. 18–20.
22. *GIS Karta – mnogofunktsionalnaya geograficheskaya informatsionnaya Sistema* [GIS Map – multifunctional geographic information system]. Available at: <http://chem-otkrit.ru/soft/GIS-Karta> (accessed 18 May 2017).
23. *Indor Map: universalnaya geoinformatsionnaya Sistema* [Indoor Map: multipurpose geographic information system]. Available at: <http://www.indorsoft.ru/products/map/> (accessed 17 May 2017).
24. Fadeev A.N., Zimina O.A. *Primenenie GIS «Karta 2003» v lesnom khozyaystve* [Application of GIS «Karta 2003» for forestry]. *Geoprofi*, 2006, no. 6, pp. 25–27.
25. *Geograficheskie informatsionnye sistemy v neftegazovoy promyshlennosti* [Geographic information systems for oil and gas industry]. Tyumen, SibNats Publ., 2002. 324 p. Available at: <http://www.geokniga.org/books/5287> (accessed 11 May 2017).
26. *Vserossiyskie nauchno-prakticheskie konferentsii «Geoinformatika» v neftegazovoy otrasli. Geoinformatsionny portal GIS-Assotsiatsii* [Russia-wide research and practice conferences «Geoinformatics» in oil and gas industry. Geoinformation web portal of the GIS association]. Available at: <http://www.gisa.ru/conf.html> (accessed 12 May 2017).
27. *GIS-tehnologii Esri v neftegazovoy otrasli* [GIS-technologies for oil and gas industry]. Available at: <https://www.data-plus.ru/events/klyazma-2017/> (accessed 17 May 2017).
28. *ArcGIS Platform*. Available at: <http://esri.com/arcgis/about-arcgis> (accessed 16 May 2017).
29. *MapInfo Pro™ – Desktop GIS*. Available at: <http://www.pitney-bowes.com/us/location-intelligence/geographic-information-systems/mapinfo-pro.html> (accessed 17 May 2017).
30. *Nastolnye GIS kompanii Esri* [Desktop GIS by Esri]. Available at: <https://www.esri-cis.ru/products/arcgis-for-desktop/detail/key-features/> (accessed 16 May 2017).
31. *App Studio for ArcGIS*. Available at: <http://www.esri.com/landing-pages/appstudio> (accessed 16 May 2017).
32. *MapInfo Pro – mirovoy lider na rynke GIS i kartograficheskikh prilozheniy* [MapInfo Pro is the worldwide leading company in GIS and cartographic software market]. Available at: <http://mapinfo.ru/product/mapinfo-professional> (accessed 17 May 2017).
33. *ArcGIS 10.5 includes the latest release of Esris enterprise GIS*. Available at: <http://www.esri.com/arcgis/whats-new> (accessed 17 May 2017).
34. *Professionalnaya GIS «Panorama» 12* [Professional GIS «Panorama» 12]. Available at: http://gisinfo.ru/products/map12_prof.htm (accessed 18 May 2017).
35. Yaldychina N.B. *GETMAP – novoe reshenie dlya sozdaniya veb-GIS* [GETMAP is a new solution for web-GIS development]. *Geomatika*, 2015, no. 4, pp. 25–31.
36. *QGIS is a free, open source, cross platform GIS*. Available at: <http://github.com/qgis/QGIS> (accessed 19 May 2017).
37. *Professionalnaya GIS «Karta 2011»* [Professional GIS «Karta 2011»]. Available at: <http://innoter.com/software/874> (accessed 19 May 2017).
38. *Geoinformatsionnaya sistema Geobuilder™ Quantum* [Geographic information system Geobuilder™ Quantum]. Available at: <http://geobuilder.ru/produkty/geobuilder-quantum> (accessed 19 May 2017).
39. Andrianov V.Yu. GIS and GPS in the Oil&Gas Industry. *Rogtec*, 2014, no. 10, pp. 20–31. Available at: http://rogtecmagazine.com/wp-content/uploads/2014/10/5_GIS-GPS.pdf (accessed 19 May 2017). In Rus.
40. Baklanov A.V. *Korporativnye geoinformatsionnye sistemy* [Enterprise geographic information systems]. Moscow, Data+ Publ., 2011. 207 p.
41. Kasyanova E.L., Kikin P.M. Mobilnye GIS v neftegazovoy otrasli [Mobile GIS for oil and gas industry]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologii*, 2011, no. 1 (14), pp. 81–86.
42. *ADO.NET Overview*. Available at: [https://msdn.microsoft.com/en-us/library/e80y5yhx\(v=vs.80\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/e80y5yhx(v=vs.80).aspx) (accessed 19 May 2017).
43. Halvorsen Hans-Petter *ASP.NET and Web Programming*. Available at: http://home.hit.no/~hansha/documents/microsoft.net/tutorials/asp_net_web_programming/ASP.NET%20and%20Web%20Programming.pdf (accessed 20 May 2017).
44. Zykov S.V. *Tekhnologiya integratsii dannykh v geterogennykh korporativnykh programmnykh kompleksakh*. Dis. doct. nauk [The technology of data integration in heterogeneous enterprise software. Dr. Diss.]. Moscow, 2017. 466 p.
45. Andrianov V.Yu., Shcherbina S.V. Korporativnye GIS dlya vsekh i dlya kazhdogo [Enterprise GIS for everyone]. *ArcReview*, 2013, no. 1 (64), pp. 1–3.
46. Baklanov A.V. Korporativnaya GIS. Igra po pravilam [Enterprise GIS. Fair play]. *ArcReview*, 2013, no. 1 (64), pp. 3–4.
47. Kudinov A.V., Markov N.G. *Problemy avtomatizatsii proizvodstva gazodobyvayushchikh kompaniy* [Problems of production automation in gas companies]. Tomsk, Tomsk polytechnic university Publ. house, 2012. 247 p.
48. Shaev A., Mironov P., Lebedenko O. Kontseptsiya postroeniya korporativnoy geoinformatsionnoy sistemy v OAO «NK «Rosneft» [The concept of building the enterprise geographic information system in «Rosneft»]. *ArcReview*, 2005, no. 1 (32), pp. 6–8.
49. Baklanov A.V. Mirovoy opyt sozdaniya korporativnykh sistem khraneniya dannykh v neftegazovoy otrasli [Best practices for enterprise systems of data storage in oil and gas industry]. *ArcReview*, 2017, no. 2 (81), pp. 4–6.
50. *Overview of Online Analytical Processing (OLAP)*. Available at: <https://support.office.com/en-us/article/Overview-of-Online-Analytical-Processing-OLAP-15d2cdde-f70b-4277-b009-ed732b75fdd6> (accessed 19 May 2017).
51. *Esri Maps for IBM Cognos*. Available at: <http://www.esri.com/landing-pages/ibm> (accessed 20 May 2017).
52. *Programma razvitiya kompanii OAO «Gazprom kosmicheskie sistemy». Sistema «SMOTR»* [The program of OAO «Gazprom space systems» development. The system «SMOTR»]. Available at: http://www.gazprom-spacesystems.ru/new_pro (accessed 22 May 2017).
53. Veyber V., Kudinov A., Markov N. Model driven approach for oil&gas information systems and application integration. *Proceedings of the 6th Central and Eastern European Software Engineering Conference, CEE-SECR2010*. Moscow, 2010. pp. 17–22.
54. *Microsoft SQL Server 2008 R2*. Available at: <http://www.microsoft.com/ru-ru/download/details.aspx?id=44271> (accessed 18 May 2017).

55. Bogdan S., Kudinov A., Markov N. Example of implementation of MES «Magistral-Vostok» for oil and gas production enterprise. *Proceedings of the 5th Central and Eastern European Software Engineering Conference in Russia, CEE-SECR 2009*. Moscow, 2009. pp. 39–43.
56. *MapInfo MapX – bystry sposob vstroit GIS-funksii v prilozheniya* [MapInfo MapX is a fast way to implement GIS-functionality into applications]. Available at: <http://www.mapinfo.ru/product/mapinfo-mapx> (accessed 22 May 2017).

Received: 26 June 2017.

Information about the authors

Nikolay G. Markov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.43

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ МЕРИДИОНАЛЬНОГО КОНТУРА РАБОЧЕГО КОЛЕСА НА ПАРАМЕТРЫ ПОТОКА ГАЗА В РАДИАЛЬНО-ОСЕВОЙ ТУРБИНЕ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Пассар Андрей Владимирович,

passar_av@mail.ru

Вычислительный центр ДВО РАН,
Россия, 680000, г. Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65.

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования проточной части радиально-осевой турбины нового поколения газотурбинных установок, применяемых в различных отраслях промышленности. Отдельной группой газотурбинных установок малой мощности являются микротурбины (microturbines) электрической мощностью от 15 до 600 кВт, в качестве топлива использующие попутный нефтяной газ.

Цель работы. При помощи модели Я.А. Сироткина осесимметричного вихревого течения невязкой сжимаемой жидкости в проточной части радиально-осевых турбомашин исследовать влияние меридионального контура рабочего колеса на структуру потока газа в проточной части радиально-осевой турбины газотурбинной установки.

Методы исследования: метод Я.А. Сироткина для расчета осесимметричного вихревого течения невязкой сжимаемой жидкости в проточной части радиально-осевых турбомашин.

Результаты. Изложены проблемы выбора меридионального контура рабочего колеса радиально-осевой турбины. Представлены рабочие колеса: штатной турбины; с эллиптическим меридиональным контуром; с меридиональным контуром, построенным по рекомендациям А.Н. Шерстюка. Показано влияние меридионального контура рабочего колеса на структуру потока газа в проточной части радиально-осевой турбины. В результате расчета осесимметричного течения в рабочих колесах приведены распределения меридианных скоростей в зависимости от длины нормали и распределение относительной скорости вдоль линий меридианного обвода рабочих колес. На основе этих распределений определена зона обратных токов. Представлены результаты расчета поверхностей токов. Граница отрывной зоны определена при условии $w_s=0$. Представлено экспериментальное распределение полных и статических давлений на выходе из рабочего колеса штатной турбины. Сравнение результатов расчета осесимметричного течения по методу Я.А. Сироткина с результатами эксперимента доказывает, что в турбине № 1 при работе на режиме № 2 возникает отрывное течение. Из анализа осредненного по высоте лопатки окружного КПД: турбина с эллиптическим меридиональным контуром эффективнее штатной на 2,1 %; турбина с меридиональным контуром, построенным по рекомендациям А.Н. Шерстюка, эффективнее штатной на 2,6 %.

Ключевые слова:

Меридиональный контур, радиально-осевая турбина, коэффициент напора, проточная часть, характеристики турбины, степень реактивности, линия тока, газотурбинная установка.

Введение

Нефть и газ – самые важные виды сырья в мире. Особое место в нефтегазовой промышленности занимает попутный нефтяной газ (ПНГ). Долгое время ПНГ оставался для нефтяных компаний побочным продуктом, поэтому проблему его утилизации решали достаточно просто – сжигали.

В последнее время ситуация с утилизацией ПНГ стала меняться. Нефтяные компании все больше внимания уделяют проблеме рационального использования попутного газа. Активизации этого процесса способствует принятое Правительством Российской Федерации постановление № 7 от 8 января 2009 г., в котором заложено требование по доведению уровня утилизации попутного газа до 95 %.

ПНГ представляет собой смесь паробразных углеводородных составляющих природного происхождения. В связи с этим появляется возможность рационального использования ПНГ в качестве топлива газотурбинных установок.

В настоящее время крупными поставщиками газотурбинного оборудования для нефтегазовой промышленности являются компании Opra Turbines и Dresser-Rand. Первая предлагает промышленные газотурбинные установки OP16, вторая –

KG3 электрической мощностью от 1530 до 2250 кВт. Уникальность конструкции этих установок заключается в одноступенчатой радиальной турбине, в то время как все конкурирующие двигатели в данном диапазоне мощности являются осевыми многоступенчатыми. Радиальная конструкция двигателей обеспечивает надежность, компактность и высокую производительность.

В отдельный класс энергетических установок следует выделить микротурбины (microturbines) электрической мощностью от 15 до 600 кВт, производимые фирмой Capstone Turbine Corporation [1–3]. В силу своей компактности микротурбины могут с успехом работать на нефтяных платформах. Более 7000 микротурбинных установок, эксплуатирующихся по всему миру для генерации энергии, в совокупности наработали миллионы операционных часов.

Известно, что эффективность газотурбинной установки определяется в том числе эффективностью газовой турбины. Выбор геометрических параметров проточной части радиально-осевой турбины, обеспечивающих её эффективную работу в составе газотурбинной установки, является сложнейшей задачей. Эту задачу можно разбить на ряд подэтапов разного уровня сложности.

На первом этапе проектирования производится газодинамический расчет ступени на среднем радиусе в одномерном квазистационарном приближении [4, 5]. Это позволяет определить высоты лопаток l_1 и l_2 на входе и выходе потока из рабочего колеса, удовлетворяющие заданному расходу газов через турбину G_T .

На втором этапе проектирования для построения меридионального обвода проточной части рабочего колеса предлагается решать обратную задачу теории турбомашин [6, 7]. Однако, как показала практика, при решении обратных задач возникает проблема – линии меридионального обвода получаются пилообразной формы. Применение релаксационного множителя не позволяет решить проблемы. Поэтому в работе [8] для решения данной проблемы предлагается в процессе машинного счета сглаживать линии тока. В качестве метода сглаживания рекомендуется применять метод кубической сплайн-аппроксимации. Следует отметить, что процесс сглаживания усложняет и без того сложный алгоритм расчета. Поэтому в практике проектирования принято контур меридионального обвода проводить по рекомендованным значениям радиуса [5], а качество структуры потока проверять на основе решения прямой задачи.

В настоящее время существует множество коммерческих CFD-пакетов (Computational Fluid Dynamics), например таких, как ANSYS CFX [9–11], CFX-TASCflow, FlowVision и др., позволяющих производить расчет газодинамического потока в проточной части турбомашин. В предисловии редактора перевода к книге С. Патанкара [12] справедливо отмечено, что эти программные продукты представляют своего рода «черный ящик», поэтому глубокий анализ полученных с их использованием результатов затруднен, а порой даже невоз-

можен. Все это нередко приводит к удручающим последствиям.

Целью настоящей работы является исследование влияния меридионального контура рабочего колеса на структуру потока газа в проточной части радиально-осевой турбины энергетической газотурбинной установки малой мощности при помощи модели Я.А. Сироткина [13] осесимметричного вихревого течения невязкой сжимаемой жидкости в проточной части радиально-осевых турбомашин.

Форма меридионального контура рабочего колеса оказывает существенное влияние на качество структуры потока и пропускную способность турбины.

Исходная геометрическая информация по проточной части

В качестве исходной информации по геометрии проточной части турбины использовались заводские чертежи рабочего колеса турбины турбокомпрессора ТКР-14С-27 (рис. 1, а), далее её будем называть турбина № 1. Угол выхода потока из соплового аппарата $\alpha_1=18^\circ$. Угол выхода потока из рабочего колеса на среднем радиусе $\beta_2=37,5^\circ$. Угол профиля лопатки β_2 в выходном сечении рабочего колеса изменяется по закону $\text{tg}\beta_2 R_{20}=\text{const}$.

Для сравнения было спроектировано рабочее колесо, внешняя и внутренняя линия меридионального контура которого представляют собой эллиптические кривые, центр которых находится на пересечении входного и выходного сечений рабочего колеса (рис. 1, б), далее её будем называть турбина № 2. А также рабочее колесо с меридиональным контуром, построенным по рекомендациям А.Н. Шерстюка [14] (рис. 1, в), внешняя линия меридионального контура которого представляет собой кубическую параболу. Далее её будем называть турбина № 3:

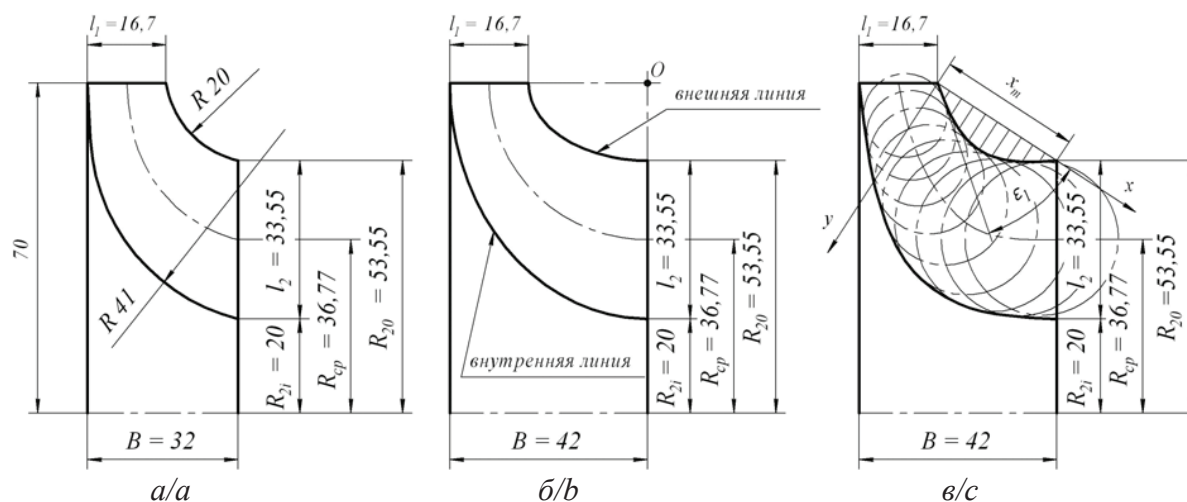


Рис. 1. Рабочие колеса радиально-осевой турбины: а) штатной турбины ТКР-14С-27; б) с меридиональным контуром, спроектированным по форме эллиптической кривой; в) с меридиональным контуром, спроектированным по рекомендациям А.Н. Шерстюка

Fig. 1. Driving wheels of the radially-axial turbine: а) standard turbine TKR-14S-27; б) the turbine with the meridian contour designed under the form of an elliptic curve; в) the turbine with the meridian contour designed under recommendations of A.N. Sherstyuk

$$\bar{y} = \bar{x}(1 - 2\bar{x}^2 + \bar{x}^3) \operatorname{tg} \varepsilon_1,$$

где $\bar{x} = x/x_m$; $\bar{y} = y/y_m$; x, y – координаты верхней линии меридионального контура (рис. 1, в); x_m – максимальное значение координаты x ; ε_1 – угол между касательной к внешней линии меридионального контура и осью x (рис. 1, в). Внутренняя линия спроектирована по линейному закону изменения площади проходного сечения F вдоль средней линии канала:

$$F = F_1 + \frac{s_a}{s_{am}}(F_2 - F_1),$$

где F_1, F_2 – площади проходного сечения канала на входе и выходе из рабочего колеса; s_a – расстояние вдоль внешней линии контура; s_{am} – максимальное значение s_a .

Угол выхода потока из обоих рабочих колес на среднем радиусе $\beta_2 = 37,5^\circ$. Угол профиля лопатки β_2 в выходном сечении для обоих рабочих колес изменяется по закону $\operatorname{tg} \beta_2 R_{20} = \operatorname{const}$.

Постановка задачи

Осесимметричный вихревой поток невязкой сжимаемой жидкости в радиально-осевых турбомашине описывается следующей системой уравнений:

- уравнение движения в энергетической форме Крокко

$$\vec{w} \times (\nabla \times \vec{c}) = \nabla h^* - T \nabla S - \vec{F} + T \frac{\vec{w}}{w^2} \frac{dS}{dt}; \quad (1)$$

- уравнение неразрывности

$$\nabla \cdot (\chi \rho \vec{w}) = 0; \quad (2)$$

- уравнение первого закона термодинамики

$$\frac{dU}{dt} + p \frac{d\rho^{-1}}{dt} = T \frac{dS}{dt}; \quad (3)$$

- уравнение состояния идеального газа

$$p = \rho RT, \quad (4)$$

где

$$dU = c_v dT; \quad h^* = h + \frac{w^2 - u^2}{2};$$

$$h = c_p T = \frac{kR}{k-1} T; \quad \left(k = \frac{c_p}{c_v} \right).$$

В уравнениях приняты следующие обозначения: w и c – относительная и абсолютная скорость

потока, м/с; ∇ – оператор набла $\nabla = \frac{e_i}{H_i} \frac{\partial}{\partial q_i}$, $q_i, e_i,$

H_i – криволинейная координата, ее единичный вектор и коэффициент Ляме; ∇h^* – градиент удельной полной энтальпии в относительном потоке, м/с²; h – удельная энтальпия, Дж/кг; ∇S – градиент удельной энтропии, м²/(К·с²); T – абсолютная температура, К; F – массовая сила, Н; U – удельная внутренняя энергия, Дж/кг; k – показатель

изоэнтропы; c_p и c_v – удельные теплоемкости при постоянном давлении и объеме, Дж/(кг·К); p – давление, МПа; ρ – плотность, кг/м³; R – газовая постоянная, Дж/(кг·К); u – окружная скорость вращения ротора, м/с; ω – угловая скорость рабочего колеса, с⁻¹; χ – коэффициент стеснения; r – расстояние от оси вращения, м.

При этом рассматривается установившийся вихревой поток. Причем завихренность обусловлена наличием лопастей в потоке. Энтропия меняется поперек и вдоль линий тока. Жидкость сжимаемая и идеальная. Основным эффектом вязкости учитывается коэффициентом изоэнтропийности $\sigma = \exp[S_1 - S/R]$, (S_1 – энтропия перед входом в решетку; S – текущая энтропия; R – газовая постоянная), который считается функцией параметров потока и координат. Принята гипотеза осевой симметрии потока [15, 16].

В работе [13] решение рассматриваемой задачи строится на полуфиксированной сетке методом прямых [17]. Изменение коэффициента изоэнтропийности задается квадратичной зависимостью от длины линии тока. Опуская преобразования, приведенные в работе [18], запишем в окончательном виде расчетную систему уравнений. Все производные аппроксимируются центральными разностями [19], и система уравнений (1), (3) и (4) переходит в обыкновенное дифференциальное уравнение, которое заменяется эквивалентным интегральным:

$$\begin{aligned} w_s = w_{s0} + \\ + \int_0^l \left[\frac{1}{1 + \operatorname{ctg}^2 \beta} \left\{ \frac{1}{w_s} \left[\frac{dH^*}{dl} - T \left(\frac{dS}{dl} - \frac{\Delta S}{\Delta s} \sin \xi \right) - \right. \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{T}{2} \operatorname{tg} \delta \sin 2\beta \cos \xi \frac{\Delta S}{\Delta s} \right] - \right. \\ \left. - \frac{w_s}{2r^2} \left[\frac{d(\operatorname{rctg} \beta)^2}{dl} - \frac{\Delta(\operatorname{rctg} \beta)^2}{\Delta s} \sin \xi \right] + \right. \\ \left. + \left[2\omega \operatorname{ctg} \beta \cos \gamma - \frac{\Delta \gamma}{\Delta s} w_s - \frac{\operatorname{tg} \delta}{r} \frac{\Delta(c_u r)}{\Delta s} \right] \cos \xi \right] + \\ \left. + \frac{\Delta w_s}{\Delta s} \sin \xi \right] dl, \quad (5) \end{aligned}$$

где символом ∇ обозначена конечная разность. Величины β и δ определяются следующими соотношениями:

$$\operatorname{ctg} \beta = (\operatorname{ctg} \beta' + \operatorname{tg} \gamma \operatorname{tg} \delta') \cos \gamma;$$

$$\operatorname{tg} \delta = (\operatorname{tg} \delta' - \operatorname{tg} \gamma \operatorname{ctg} \beta') \cos \gamma,$$

где β' и δ' – углы средней поверхности лопатки (рис. 2); γ – угол между вектором скорости w_s и осью z (рис. 2); угол $\xi = \gamma_0 - \gamma$, где γ_0 – угол между вектором скорости w_s и осью z на внешней линии меридионального обвода.

Вместо уравнения неразрывности в дифференциальной форме (2) приведем эквивалентные ему уравнения, записанные в виде интеграла с переменным верхним пределом $l = l(s, l)$ для каждой нормали l (рис. 5):

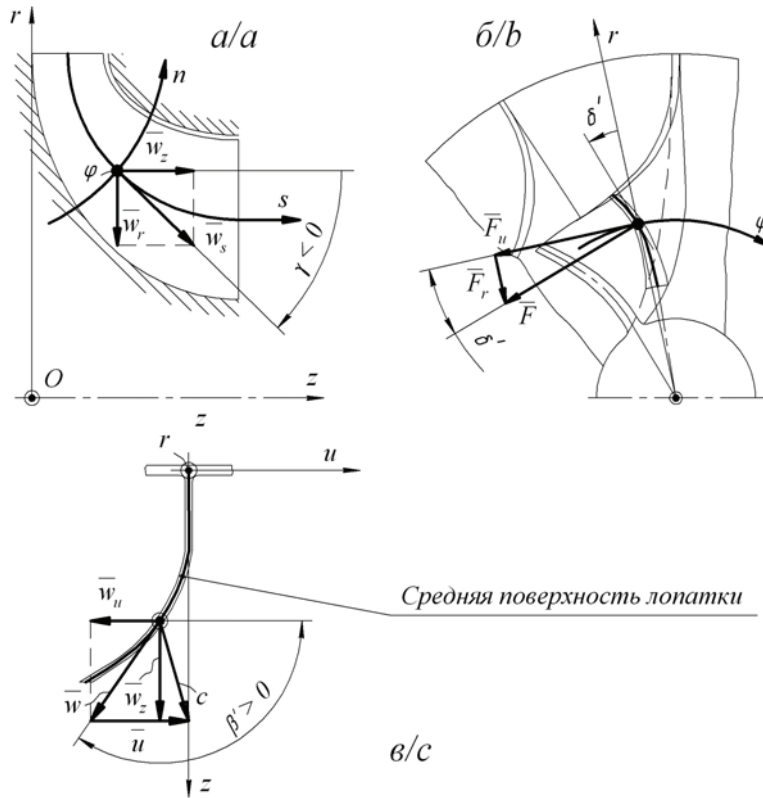


Рис. 2. Основные обозначения геометрических и газодинамических параметров осредненного осесимметричного потока в полужестко зафиксированной сетке: а, б, в – соответственно, проекции на плоскости перпендикулярные осям φ , z и r

Fig. 2. Basic designations of geometrical and gas-dynamic parameters of averaged axial-symmetric flow in a semifixed grid: a, b, c are the plane projections perpendicular to axes φ , z and r , correspondingly

$$G_{\delta}(l) = 2\pi \int_0^{l(s,l_i)} r \chi \rho w_s \cos \xi dl, \quad (6)$$

где $l=l(s,l_i)$ – уравнение подлежащей определению линии тока s (рис. 5); l_i – текущая координата вдоль линии l ; $\chi=1-s'/t$ – коэффициент стеснения (s' – толщина лопасти в окружном направлении, t – шаг решетки).

Алгоритм расчета

Полученная система интегральных уравнений (5), (6) с неизвестным переменным верхним пределом l решается методом последовательных приближений [20, 21]. На рис. 3 представлена блок-схема алгоритма решения системы уравнений (5), (6).

Опишем порядок расчета одного приближения для одного сечения l . Проводим семейство нормалей l к внешней линии меридионального обвода (рис. 5). Прежде всего надо определить все геометрические параметры лопасти $\beta'=\beta'(l)$, $\delta'=\delta'(l)$, $\chi=\chi(l)$ вдоль всех прямых l , т. е. построить соответствующие интерполяционные полиномы. После этого предварительно наносим по принципу равных кольцевых площадей линии тока (рис. 5). Кроме того, во всех узлах расчетной области задаем меридиональную проекцию относительной скорости w_s , например постоянную для каждого сечения l , полученную из уравнения расхода для струйки.

Затем вычисляем все газодинамические величины, входящие в подинтегральное выражение (5), и частные производные по s одновременно во всей расчетной области и приступаем к вычислению интегралов (5) во всех сечениях. В результате чего последние принимают вид:

$$w_{si,j} = w_{s0i} + d v_{i,j}, \quad (7)$$

где $d v_{i,j}$ – заданные числа.

Подставляя выражения (7) в уравнение расхода (6), в котором верхний предел полагаем равным L , определяем w_{s0} для всех сечений, а следовательно, и значение w_s для исходных узлов:

$$w_{s0i} = \frac{G_{\delta} - 2\pi \int_0^L r \rho \chi d v \cos \xi dl}{2\pi \int_0^L r \rho \chi \cos \xi dl}. \quad (8)$$

Таким образом, мы получили для всей области значения w_s в старых узлах. Теперь приступаем к определению второй неизвестной $l_{i,j}$ из уравнения (6). Для этого построим график $G_{\delta}(l)$ на основе исходных узлов (рис. 4, св. точки), при этом G_{τ} определяем по формуле (6).

На этот же график наносим линии расхода через струйки тока $dG_{\tau}=G_{\tau}/j$, где j – количество струек тока. В результате чего находим соответ-

ствующее ему значение $l_{i,j}^{(2)}$, т. е. находим новые узлы (черные точки на графике рис. 5). Находим и величину смещения линий тока в узлах $\delta l_{i,j}^{(2)} = l_{i,j}^{(2)} - l_{i,j}$.

Ту же процедуру определения величины смещения линий тока выполним в программе MATLAB [22]. Функция $l2 = \text{spline}(G_r(1,:), l(1,:), dG_r)$ осуществляет интерполяцию кубическими сплайнами в программе MATLAB. Она интерполирует значение вектора $l(1,:)$ длины прямой, заданного при значениях аргумента, представленных в векторе $G_r(1,:)$ расхода, определенного по формуле (6), и выдает значение интерполирующей функции в виде вектора l_2 длины прямой при значениях аргумента, заданных вектором dG_r расхода через

струйки тока. В результате величина смещения линии тока в программе MATLAB определится как $\delta l(1,:) = l(1,:) - l_2$.

Далее приступаем к вычислению новых координат узлов по формулам:

$$R_{i,j}^1 = r_{i,j} + \delta l_{i,j} \cos \gamma_{i,j}, \quad Z_{i,j}^1 = z_{i,j} + \delta l_{i,j} \sin \gamma_{i,j}.$$

Значение скоростей в новых узлах вычисляются по зависимости

$$w_{si,j}^1 = w_{si,j} + \frac{dw_{si,j}}{dl} \delta l_{i,j},$$

где $\delta l_{i,j}$ – смещения узлов.

Затем приступаем к расчету следующего приближения. Расчет продолжают до тех пор, пока

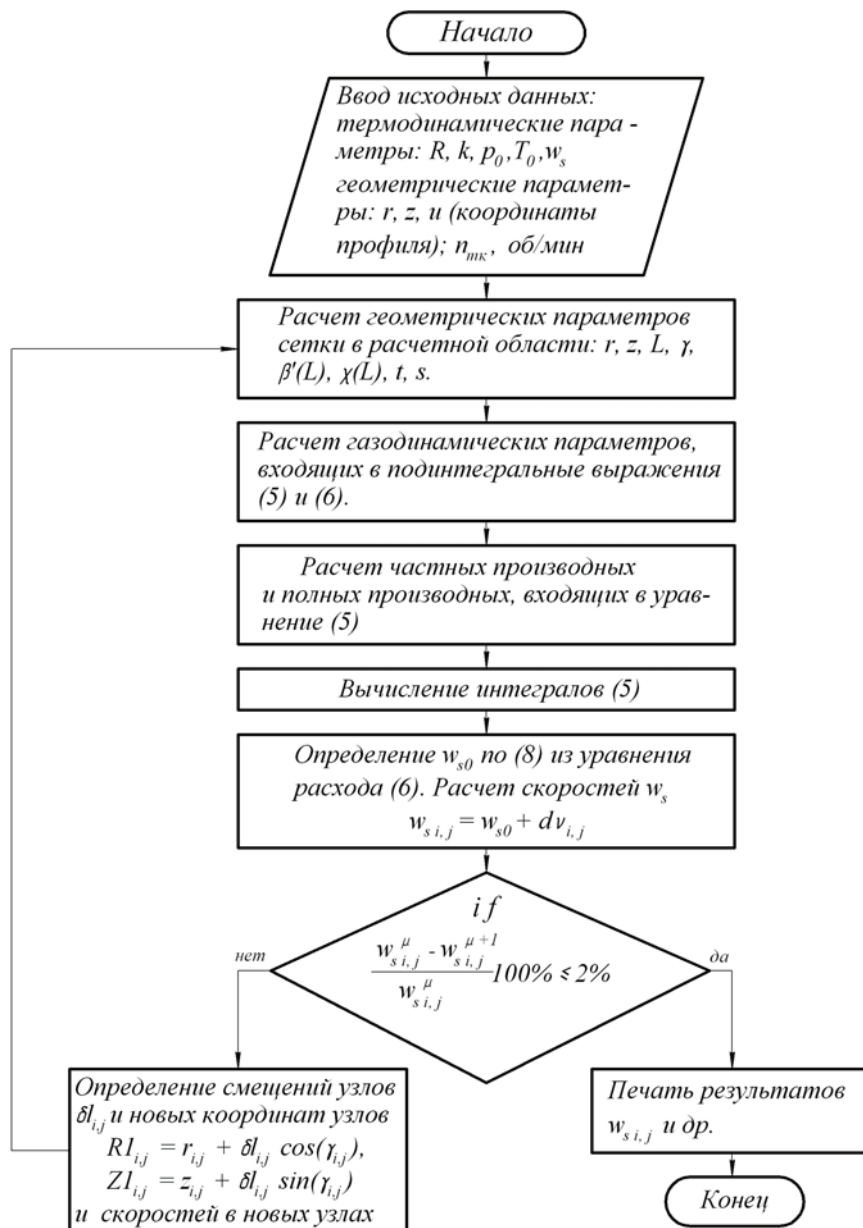


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчета

Fig. 3. Block diagram of the calculation algorithm

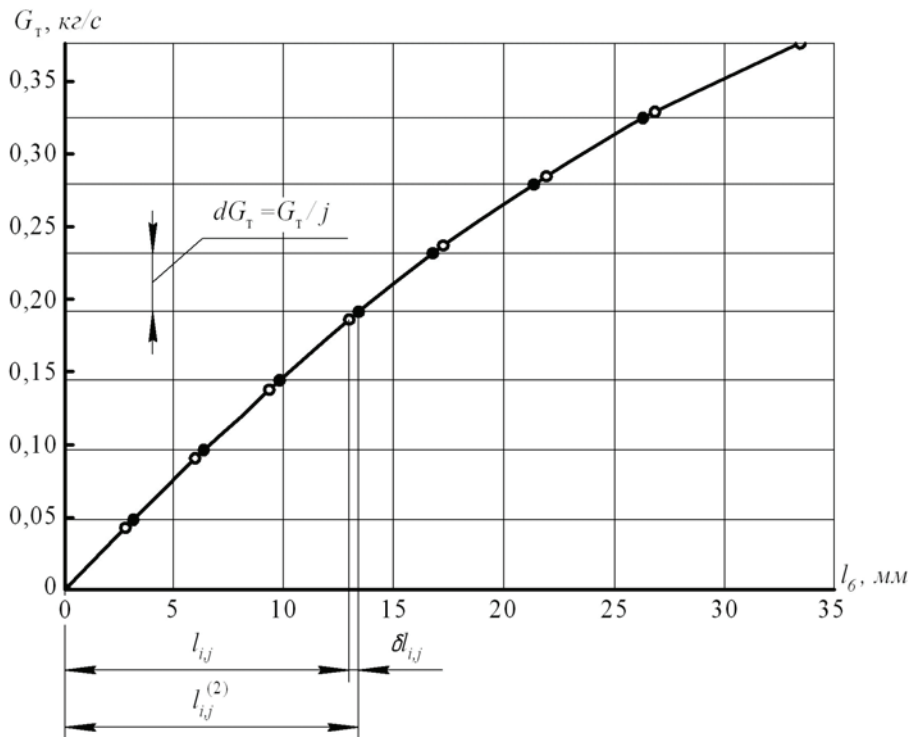


Рис. 4. Определение величины смещения линий тока

Fig. 4. Definition of size of displacement of lines of a current

$w_s^{(\mu)} \approx w_s^{(\mu+1)}$ не совпадут с заданной точностью во всех узлах (μ – номер приближения). Необходимая точность расчетов определяется выполнением условия: максимум абсолютной величины меньше заданной точности

$$\max \left(\text{abs} \left(\frac{w_s^{\mu} - w_s^{\mu+1}}{w_s^{\mu}} \right) \cdot 100 \% \right) < 1 \dots 3 \%$$

Формирование расчетных режимов

В расчетах по модели осесимметричного вихревого течения задавались следующие исходные данные, соответствующие расчетному режиму, определенные в результате расчета ступени по модели на среднем радиусе в одномерном квазистационарном приближении.

Для штатной турбины № 1. Режим № 1 – коэффициент напора $\bar{H}_T = 2,5$, где $\bar{H}_T = \frac{2H_T}{u_1^2}$, H_T – мгновенное значение изоэнтропийного теплоперепада

от полных параметров перед турбиной до статического давления за турбиной; u_1 – окружная скорость на входе в рабочее колесо; расход газов $G_T = 0,396$ кг/с; давление торможения на входе в ступень $p_0^* = 0,1575$ МПа; давление на входе в рабочее колесо $p_1 = 0,1279$ МПа; степень понижения давления газа в ступени $\pi_T = p_0^*/p_2 = 1,485$; температура торможения на входе в ступень $T_0^* = 750$ К; температура на входе в рабочее колесо $T_1 = 717$ К; степень реактивности $\rho = 0,461$; коэффициент скоро-

сти в рабочем колесе $\psi = 0,93$; частота вращения $n_{TK} = 35000$ мин⁻¹.

Режим № 2 – точка малого теплоперепада; коэффициент напора $\bar{H}_T = 1,62$; расход газов $G_T = 0,253$ кг/с; давление торможения на входе в ступень $p_0^* = 0,1363$ МПа; давление на входе в рабочее колесо $p_1 = 0,1238$ МПа; степень понижения давления газа $\pi_T = 1,285$; температура торможения на входе в ступень $T_0^* = 750$ К; температура на входе в рабочее колесо $T_1 = 735$ К; степень реактивности $\rho = 0,611$; коэффициент скорости в рабочем колесе $\psi = 0,75$; частота вращения $n_{TK} = 35000$ мин⁻¹.

Для опытных турбин № 2 и 3. Режим № 1' – коэффициент напора $\bar{H}_T = 2,5$; расход газов $G_T = 0,395$ кг/с; давление торможения на входе в ступень $p_0^* = 0,1575$ МПа; давление на входе в рабочее колесо $p_1 = 0,1278$ МПа; степень понижения давления газа $\pi_T = 1,485$; температура торможения на входе в ступень $T_0^* = 750$ К; температура на входе в рабочее колесо $T_1 = 717$ К; степень реактивности $\rho = 0,464$; коэффициент скорости в рабочем колесе $\psi = 0,93$; частота вращения $n_{TK} = 35000$ мин⁻¹.

Режим № 2' – точка малого теплоперепада; коэффициент напора $\bar{H}_T = 1,38$; расход газов $G_T = 0,2$ кг/с; давление торможения на входе в ступень $p_0^* = 0,1363$ МПа; давление на входе в рабочее колесо $p_1 = 0,1234$ МПа; степень понижения давления газа $\pi_T = 1,238$; температура торможения на входе в ступень $T_0^* = 750$ К; температура на входе в рабочее колесо $T_1 = 740$ К; степень реактивности $\rho = 0,705$; коэффициент скорости в рабочем колесе $\psi = 0,53$; частота вращения $n_{TK} = 35000$ мин⁻¹.

Результаты расчетов

Для расчета потока в проточной части радиально-осевой турбины была составлена программа, при этом использовался пакет прикладных программ МАТЛАВ.

Рассмотрим некоторые результаты численных расчетов газовой динамики осесимметричного вихревого течения невязкой сжимаемой жидкости, проведенных в рабочих колесах радиально-осевых турбин. В расчетах задавались исходные данные, определенные в результате расчета ступени по модели на среднем радиусе в одномерном квазистационарном приближении. На рис. 5–7 тонкими линиями показаны линии предваритель-

ного разбиения канала по принципу равных кольцевых площадей, толстыми линиями – линии тока, определенные в результате последовательных приближений. Из этого видно, что поверхности тока окончательного приближения существенно отличаются от поверхностей тока исходного приближения. Во всех расчетных областях погрешность по скоростям w_s составила менее 1%. Среднее время, затраченное процессором на одну итерацию, и количество итераций приведены в таблице. Коэффициент релаксации при этом равен $\alpha=0,5$. Расчеты проводились на персональном компьютере с процессором AMD A8-6600K частотой ядра 3,9 ГГц, объем оперативной памяти 4096 Мб.

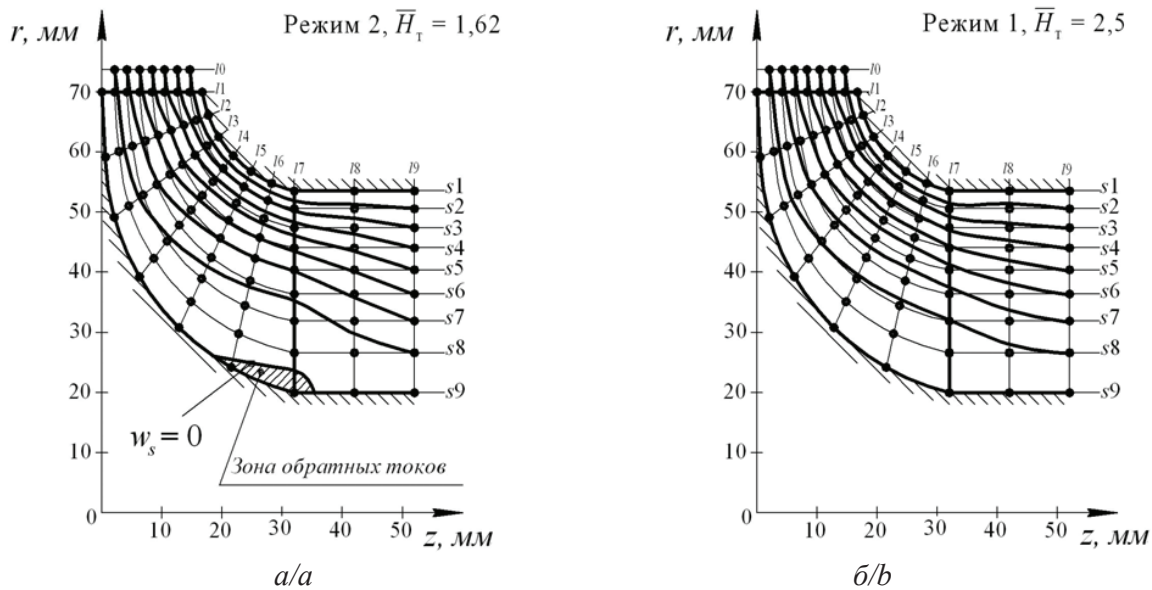


Рис. 5. Результаты расчета поверхностей тока в турбине № 1: а) режим 2, $\bar{H}_T=1,62$; б) режим 1, $\bar{H}_T=2,5$

Fig. 5. Calculation results of current surfaces in the turbine № 1: a) mode 2; b) mode 1

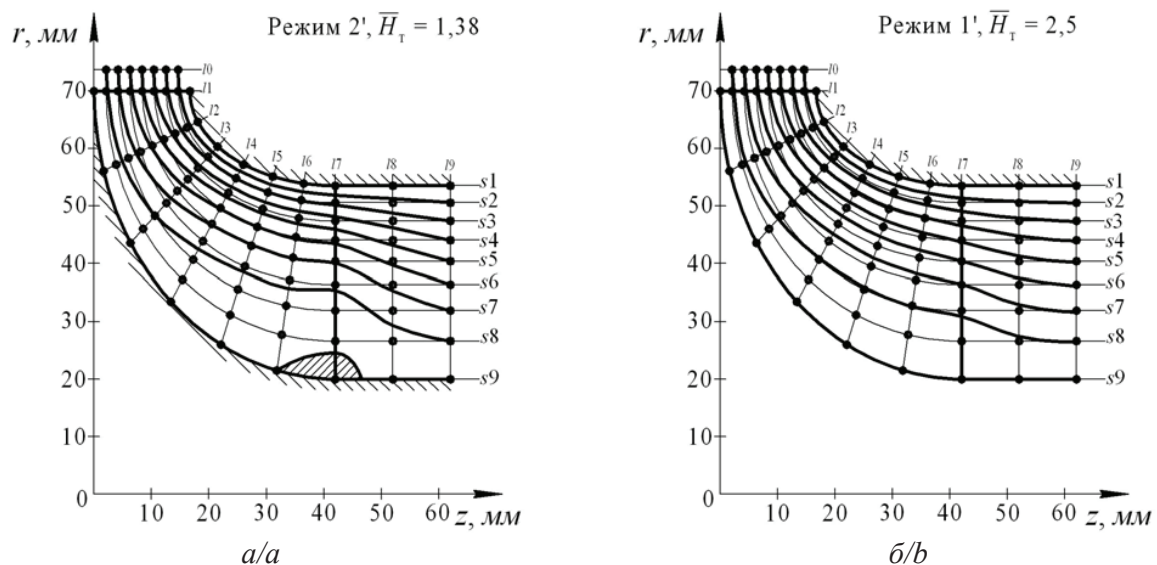


Рис. 6. Результаты расчета поверхностей тока в турбине № 2: а) режим 2', $\bar{H}_T=1,38$; б) режим 1', $\bar{H}_T=2,5$

Fig. 6. Calculation results of current surfaces in the turbine № 2: a) mode 2'; b) mode 1'

Таблица. Среднее время, затраченное процессором на одну итерацию, и количество итераций

Table. Average time spent for one iteration by the processor and quantity of iterations

№ турбины Turbine no.	Время на одну итерацию, с Time for one iteration, s		Количество итераций Quantity of iterations	
	Режим/Mode			
	1 and 1'	2 and 2'	1 and 1'	2 and 2'
1	0,01–0,012	0,01–0,016	14	14
2	0,0097–0,013	0,0098–0,011	13	20
3	0,0098–0,068	0,0098–0,067	12	15

В результате расчета осесимметричного течения в рабочих колесах были получены меридиональные проекции скорости w_s во всех узлах сеток расчетных областей. На рис. 8–10 показаны распределения меридиональных скоростей в зависимости от относительной длины нормалей \bar{l} : где $\bar{l} = l_{i,тек}/l_{i,полн}$, $l_{i,тек}$, $l_{i,полн}$ – текущая и полная длина нормали соответственно; i – номер нормали.

Как видно, для всех расчетных областей с увеличением кривизны канала величина скорости в поперечных сечениях растет от внутреннего $\bar{l}=1$ к внешнему $\bar{l}=0$ обводу профиля.

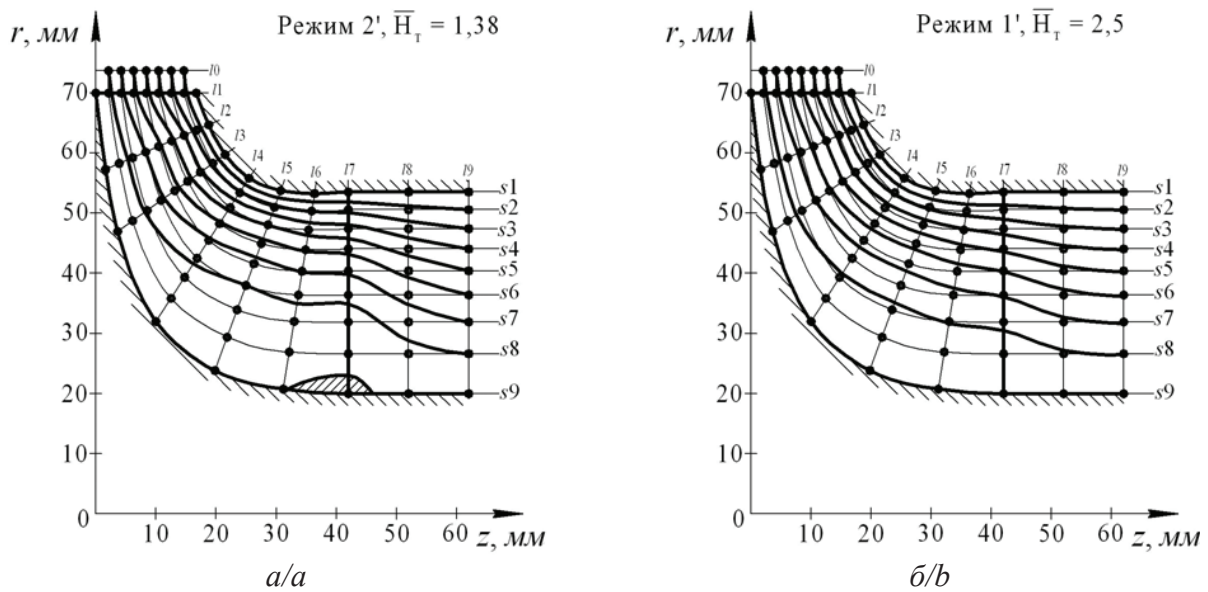


Рис. 7. Результаты расчета поверхностей тока в турбине № 3: а) режим 2', $\bar{H}_T=1,38$; б) режим 1', $\bar{H}_T=2,5$

Fig. 7. Calculation results of current surfaces in the turbine № 3: a) mode 2'; b) mode 1'

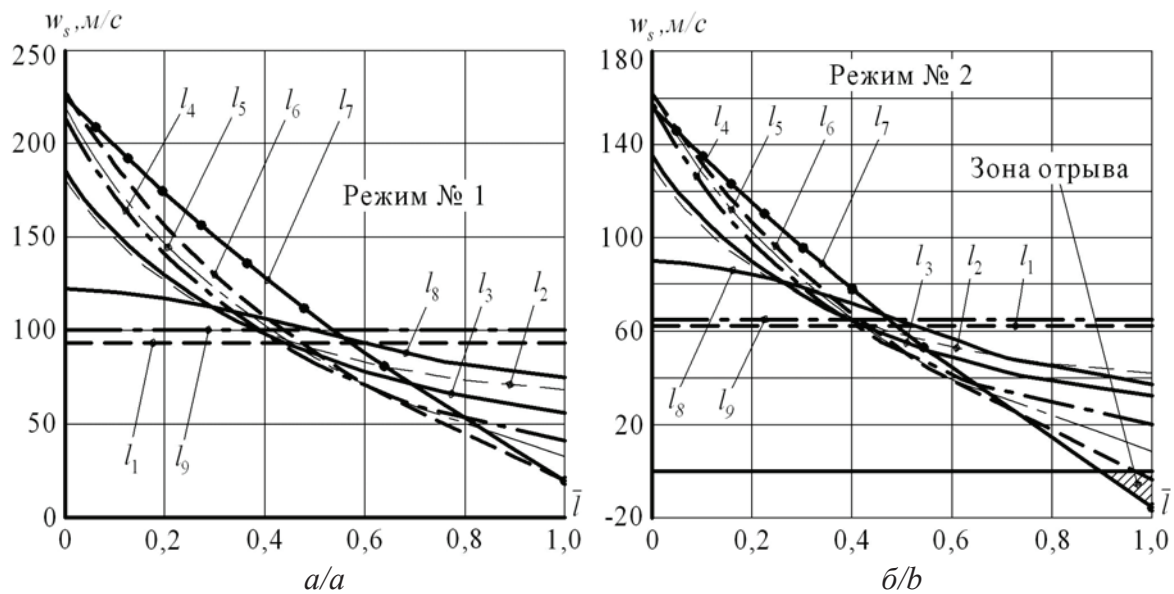


Рис. 8. Распределение меридиональных скоростей w_s в зависимости от относительной длины нормалей \bar{l} для расчетной области штатной турбины № 1: а) режим 1; б) режим 2

Fig. 8. Distribution of meridian speeds w_s , depending on relative length of normals \bar{l} for design area of the standard turbine № 1: a) mode 1; b) mode 2

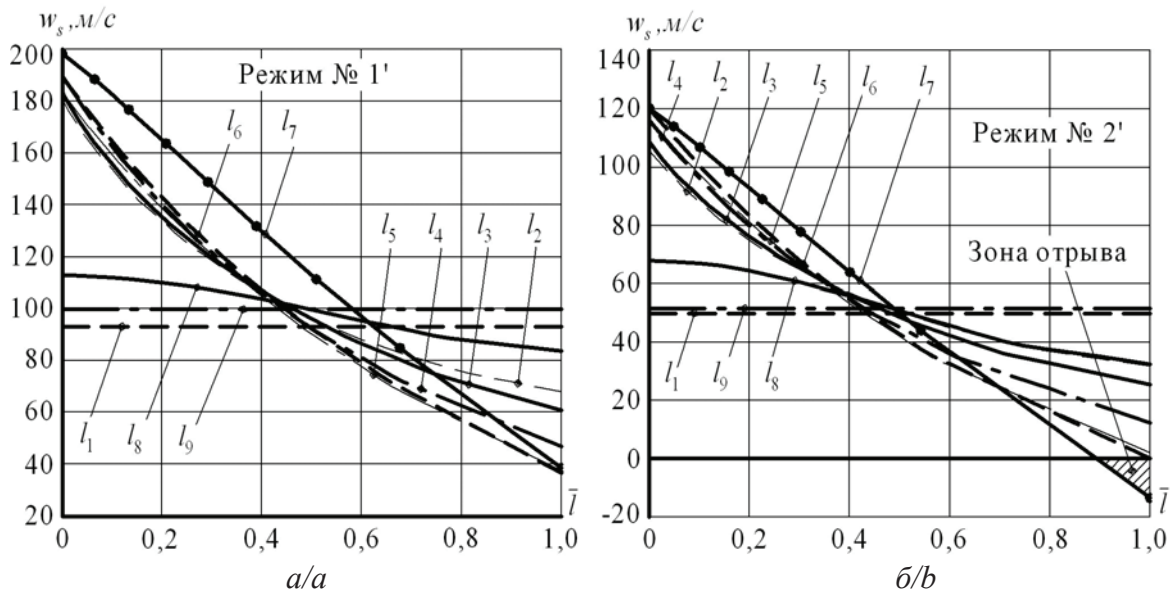


Рис. 9. Распределение меридиональных скоростей w_s в зависимости от относительной длины нормалей \bar{l} для расчетной области рабочего колеса турбины № 2: а) режим 1'; б) режим 2'

Fig. 9. Distribution of meridian speeds w_s depending on relative length of normals \bar{l} for design area of the driving wheel of the turbine 2: a) mode 1'; b) mode 2'

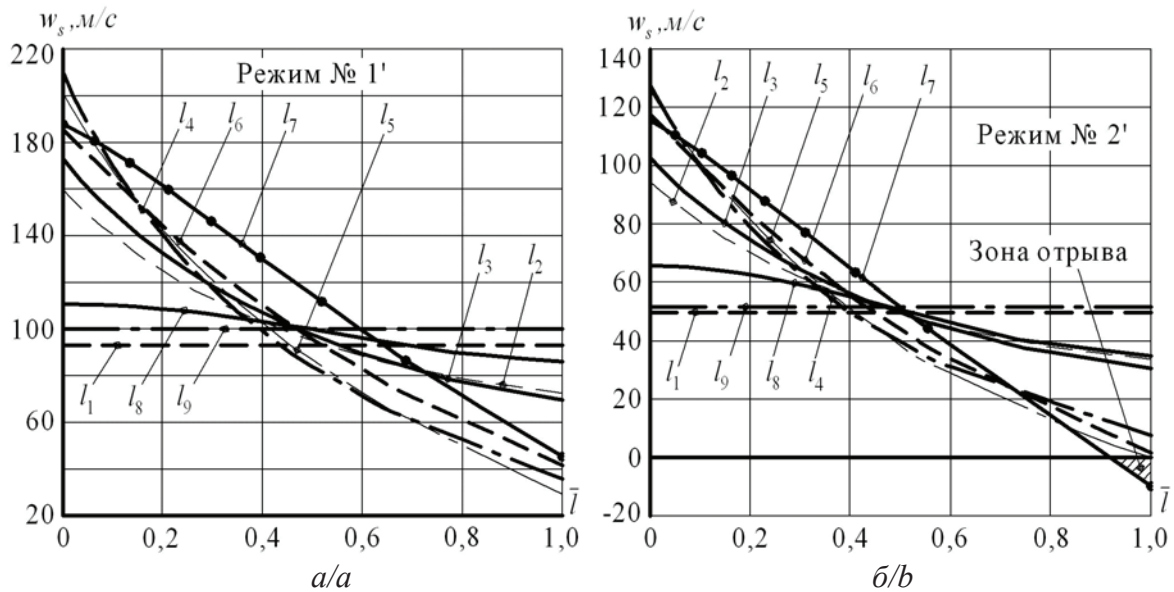


Рис. 10. Распределение меридиональных скоростей w_s в зависимости от относительной длины нормалей \bar{l} для расчетной области рабочего колеса турбины № 3: а) режим 1'; б) режим 2'

Fig. 10. Distribution of meridian speeds w_s depending on relative length of normals \bar{l} for design area of the driving wheel of the turbine 3: a) mode 1'; b) mode 2'

В расчетной области штатной турбины № 1 перепад скоростей $\Delta w_s = w_{сн} - w_{св}$ ($w_{сн}$ и $w_{св}$ – скорости потока на внешнем и внутреннем обводе профиля, соответственно) нарастает: для расчетного режима № 1 ($H_r = 2,5$; $\pi_r = 1,485$) вплоть до сечения l_6 , достигая своего максимального значения $\Delta w_s = 207,5$ м/с (рис. 8, а); для расчетного режима № 2 ($H_r = 1,62$; $\pi_r = 1,285$) вплоть до сечения l_7 , достигая своего максимального значения $\Delta w_s = 171,3$ м/с (рис. 8, б).

Возрастание перепада скоростей Δw_s в расчетной области турбины № 2, с меридиональными обводами, построенными по форме эллиптической кривой, происходит: для расчетного режима № 1' ($H_r = 2,5$; $\pi_r = 1,485$) вплоть до сечения l_7 , достигая своего максимального значения $\Delta w_s = 158,6$ м/с (рис. 9, а); для расчетного режима № 2' ($H_r = 1,38$; $\pi_r = 1,238$) вплоть до сечения l_7 , достигая своего максимального значения $\Delta w_s = 133,6$ м/с (рис. 9, б).

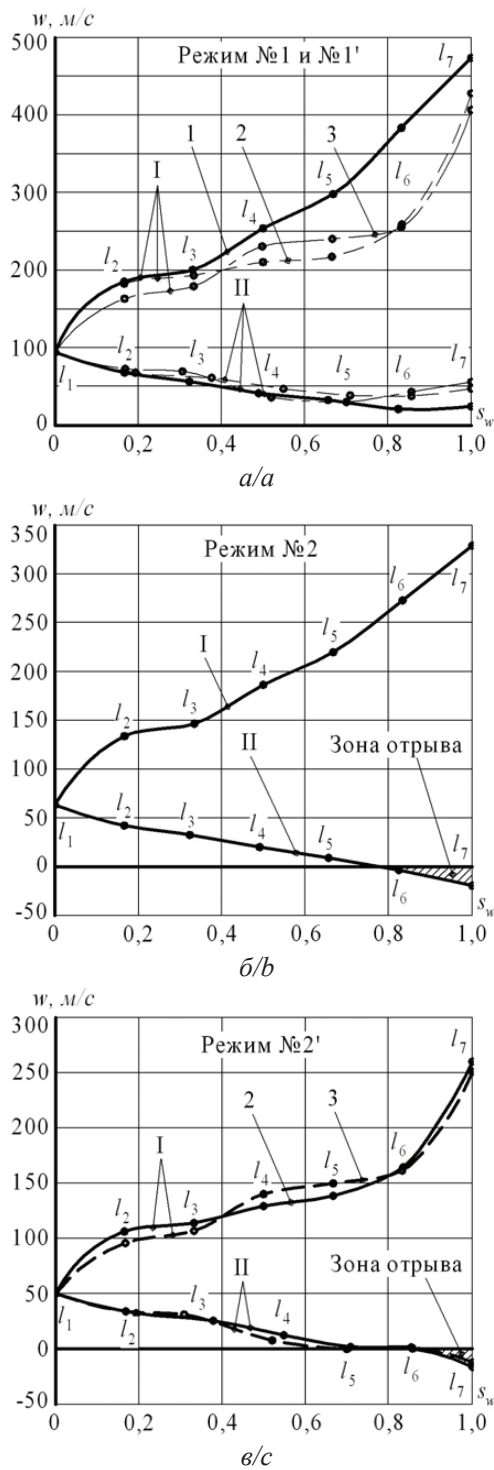


Рис. 11. Распределение относительной скорости по обводам меридианного профиля: а) в турбинах № 1, 2 и 3 для режимов 1 и 1'; б) в турбине № 1 для режима № 2; в) в опытных турбинах № 2 и 3 для режима № 2'; 1 – турбина № 1; 2 – турбина № 2; 3 – турбина № 3; I – внешний контур; II – внутренний контур

Fig. 11. Distribution of relative speed w along the bypasses of a meridian structure: а) in turbines 1, 2 and 3 for modes 1 and 1'; б) in the turbine 1 for the mode 2; в) in tested turbines 2 and 3 for the mode 2'; 1 is the turbine 1; 2 is the turbine 2; 3 is the turbine 3; I is the external contour; II is the internal contour

В расчетной области турбины № 3, с меридиональными обводами, построенными по рекомендациям А.Н. Шерстюка, перепад скоростей Δw_s нарастает: для расчетного режима № 1' ($H_t=2,5$; $\pi_t=1,485$) вплоть до сечения l_4 , достигая своего максимального значения $\Delta w_s=175,5$ м/с (рис. 10, а); для расчетного режима № 2' ($H_t=1,38$; $\pi_t=1,238$) вплоть до сечения l_7 , достигая своего максимального значения $\Delta w_s=125,7$ м/с (рис. 10, б).

Таким образом, с уменьшением степени понижения давления газа π_t в ступени происходит уменьшение перепада скорости Δw_s .

В безлопаточном пространстве за рабочим колесом, линии l_8 и l_9 , поток выравнивается, и скорость практически не изменяется по длине l (рис. 8–10). Для всех расчетных областей и для всех режимов, несмотря на сложный характер течения, распределение меридиональных скоростей вдоль линии выходного сечения l_7 близко к линейному.

Как видно из рис. 5–7, с увеличением кривизны канала линии тока «поджимаются» к корпусу турбины. Особенно сильно это выражено: в турбине № 1 для расчетного режима № 2 в области линий l_6 и l_7 ; в турбине № 2 для расчетного режима № 2' в области линии l_7 ; в турбине № 3 для расчетного режима № 2' в области линии l_7 . В этих сечениях, как показали результаты расчетов, получаются отрицательные значения меридиональных скоростей w_s : для штатной турбины № 1 $w_s=-3$ м/с для сечения l_6 и $w_s=-15$ м/с для сечения l_7 (рис. 8, б); для турбины № 2, с меридиональным контуром, построенным по форме эллиптической кривой, $w_s=-13,5$ м/с для сечения l_7 (рис. 9, б); для турбины № 3, с меридиональным контуром, построенным по рекомендациям А.Н. Шерстюка, $w_s=-10$ м/с для сечения l_7 (рис. 10, б). Это обстоятельство дает основание предполагать, что в проточной части возникает отрыв потока (обратный ток в идеальной жидкости). На рис. 5, а, 6, а и 7, а зона обратных токов заштрихована. Граница отрывной зоны определена при условии $w_s=0$. С увеличением степени понижения давления газа π_t в ступени поверхности тока несколько выравниваются. Так, например, в случае расчетных режимов № 1 и 1' линии тока плавней, чем в случае режимов № 2 и 2'. С уменьшением степени понижения давления газа в ступени предположительно возникает отрывная зона. Для штатной турбины № 1 отрывная зона возникает при степени понижения давления газа в ступени $\pi_t=1,285$ (рис. 5, а), а для опытных турбин № 2 и 3 отрывная зона возникает при степени понижения давления газа в ступени $\pi_t=1,238$ (рис. 6, а и 7, а).

Таким образом, за счет увеличенной ширины колеса на 10 мм в опытных турбинах удалось сдвинуть отрывную зону в сторону меньших степеней понижения давления газа в ступени.

По данным, приведенным на рис. 8–10, были получены распределения полных (относительных) скоростей w по обводам профиля (рис. 11). По оси абсцисс отложено безразмерное расстояние

$s_w = s_n / s_{\Sigma n}$, $s_w = s_b / s_{\Sigma b}$ – длина наружного и внутреннего обвода, отнесенная к общей длине наружного и внутреннего обвода. По оси ординат отложена полная скорость $w = w_z / \sin \beta$. Точками на кривых помечены концы линий l .

Во всех расчетных областях и для всех расчетных режимов скорость w по внешнему обводу меридионального профиля при увеличении безразмерного расстояния s_w возрастает. В расчетных областях опытных турбин № 2 и 3 для режимов № 1' и 2', на участке от линии l_6 до линии l_7 возрастание скорости w происходит более интенсивно, чем на остальных участках (рис. 11, а, в).

Вдоль внутренней линии меридионального обвода падение скорости распространяется:

- в штатной турбине № 1 для режима № 1 на участок от линии l_1 до линии l_6 (рис. 11, а), для расчетного режима № 2 на участок от линии l_1 до линии l_7 (рис. 11, б);
- в опытной турбине № 2 для расчетного режима № 1' на участок от линии l_1 до линии l_6 (рис. 11, а), для расчетного режима № 2' на участок от первой l до седьмой линии l (рис. 11, в);
- в опытной турбине № 3 для расчетного режима № 1' на участок от линии l_1 до линии l_5 (рис. 11, а), для расчетного режима № 2' на участок от первой l до седьмой линии l (рис. 11, в).

Для турбины № 2 с обводом, построенным по форме эллиптической кривой, изменение относительной скорости w вдоль внешней и внутренней линий меридионального контура происходит плав-

ней, чем для турбины № 3 с обводом, построенным по рекомендациям А.Н. Шерстюка (рис. 11, а, в).

Критерий качества проточной части

На основе расчета осесимметричного вихревого течения невязкой сжимаемой жидкости можно решать задачу о выборе оптимальной формы проточной части. В качестве целевой функции при решении этой задачи предлагается изменение её окружного КПД по высоте лопатки на выходе из рабочего колеса

$$\eta_u(\zeta) = \frac{h_u(\zeta)}{h_0(\zeta)}, \quad (9)$$

где $h_0(\zeta)$ – располагаемый теплоперепад на линии тока ζ , рассчитываемый по параметрам торможения на входе в ступень и статическому давлению на выходе; $h_u(\zeta)$ – используемый теплоперепад на линии тока ζ .

$$h_u(\zeta) = h_0(\zeta) - \Delta h_{ca}(\zeta) - \Delta h_{pk}(\zeta) - \Delta h_b(\zeta),$$

где $\Delta h_{ca}(\zeta)$ – потери энергии в сопловом аппарате на линии тока ζ , определяются по формуле

$$\Delta h_{ca}(\zeta) = c_1^2(\zeta) [(1 - \varphi(\zeta)^2) / 2\varphi(\zeta)^2];$$

$\Delta h_{pk}(\zeta)$ – потери энергии в рабочем колесе на линии тока ζ , определяются по формуле

$$\Delta h_{pk}(\zeta) = w_2^2(\zeta) [(1 - \psi(\zeta)^2) / 2\psi(\zeta)^2]; \quad (10)$$

$\Delta h_b(\zeta)$ – выходные потери энергии

$$\Delta h_b(\zeta) = c_2^2(\zeta) / 2; \quad (11)$$

$c_1(\zeta)$ и $c_2(\zeta)$ – абсолютные скорости на входе и выходе из рабочего колеса на линии тока ζ ; $w_2(\zeta)$ – относи-

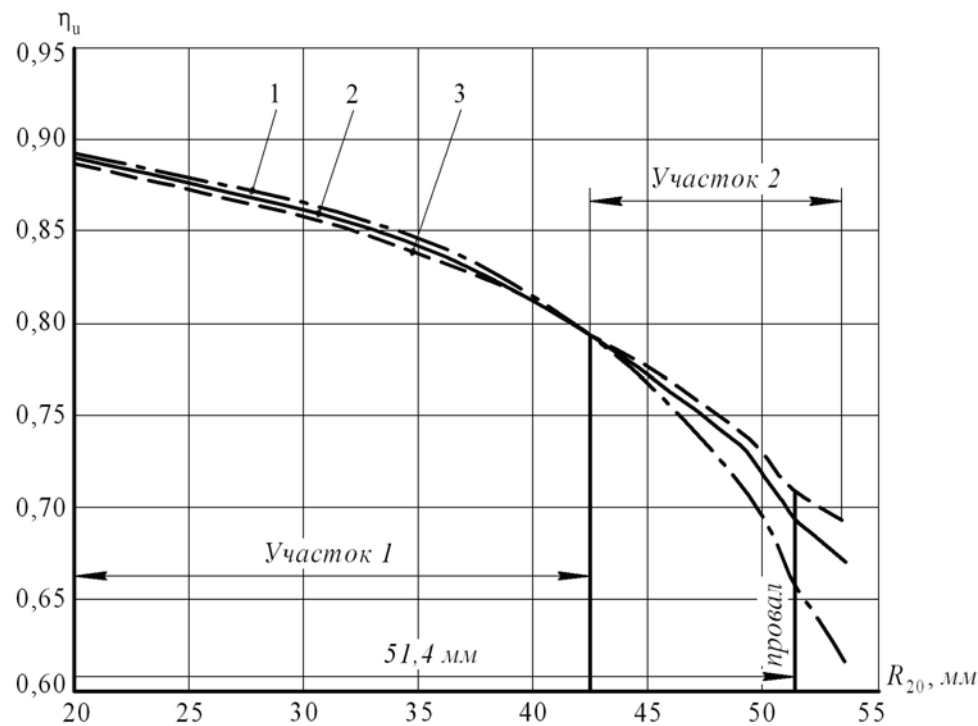


Рис. 12. Распределение окружного КПД турбины вдоль выходного сечения рабочего колеса для режимов № 1 и 1' $\bar{H}_r=2,5$: 1 – турбина № 1; 2 – турбина № 2; 3 – турбина № 3

Fig. 12. Distribution of the turbine peripheral efficiency along the output section of the driving wheel for modes 1 and 1' $\bar{H}_r=2,5$: 1 is the turbine № 1; 2 is the turbine № 2; 3 is the turbine № 3

тельная скорость на выходе из рабочего колеса на линии тока ζ ; $\varphi(\zeta)$, $\psi(\zeta)$ – коэффициенты скорости в сопловом аппарате и рабочем колесе на линии тока ζ .

Изменение окружного КПД по высоте лопатки на выходе из рабочего колеса для режимов № 1 и 1' ($\bar{H}_t=2,5$; $\pi_t=1,485$), подсчитанное по формуле (9), представлено на рис. 12.

На рис. 12 можно выделить два характерных участка. Участок 1, на котором высота лопатки на выходе из рабочего колеса изменяется от $R_{20}=20$ до $R_{20}=42,5$ мм. Этот участок характерен тем, что на нем все три турбины развивают практически одинаковый окружной КПД. Участок 2, на котором высота лопатки на выходе из рабочего колеса изменяется от $R_{20}=42,5$ до $R_{20}=53,5$ мм. Этот участок характерен тем, что разница в определении окружного КПД начинает возрастать от нуля при высоте лопатки $R_{20}=42,5$ мм. Достигая высоты лопатки $R_{20}=53,5$ мм, окружной КПД турбины № 2 превышает КПД турбины № 1 на 5,42 %, окружной КПД турбины № 3 превышает КПД турбины № 1 на 7,58 %. Это можно объяснить следующим образом. Ширина рабочего колеса штатной турбины равна $B=32$ мм, ширина рабочих колес турбин № 2 и № 3 на 10 мм больше. От величины B зависит условие перехода от радиального к осевому направлению. Естественно, что при малой ширине такой переход представляет значительные трудности.

На участке 1 общие потери в рабочем колесе, определенные по формуле (10), практически одинаковые для всех трех турбин. На участке 2 общие потери в рабочем колесе для турбины № 1 начинают значительно превышать потери для турбин № 2 и 3.

Потери с выходной скоростью, определенные по формуле (11), на участке 1 одинаковые для всех трех турбин. На участке 2 потери с выходной скоростью для турбины № 1 значительно превышают потери для турбин № 2 и 3.

Осредненный по высоте лопатки окружной КПД: для турбины № 1 $\bar{\eta}_u=0,76$; для турбины № 2 $\bar{\eta}_u=0,781$; для турбины № 3 $\bar{\eta}_u=0,786$. Вот к такому повышению окружного КПД привело увеличение ширины колеса для турбин № 2 и 3.

Провал окружного КПД в области выходного сечения $R_{20}=51,4$ мм (кривые 1, 2 и 3 на рис. 12) обусловлен порождением вторичных вихрей в периферийных струйках тока и их воздействием на основной поток.

Проверка адекватности модели

Для проверки адекватности предложенной математической модели осесимметричного вихревого течения невязкой сжимаемой жидкости в проточной части радиально-осевой турбины выполнен цикл экспериментальных исследований серии турбокомпрессоров типа ТКР-14. Для этой цели создан стенд для продувки турбин турбокомпрессоров типа ТКР-14. Стенд включает в себя: две воздуходувки ТВ-42 (производительность 60 м³/мин, мощность 55 кВт), соединенные последовательно для

получения необходимого напора перед турбиной; систему смазки подшипников вала ротора; трубопроводы с регулировочными задвижками, позволяющими устанавливать необходимый режим работы турбокомпрессора; измерительные приборы для измерения давления, температуры и частоты вращения ротора турбокомпрессора.

Параметры потока за ступенью турбины измерялись следующим образом. Непосредственно за рабочим колесом на расстоянии приблизительно шага между рабочими лопатками (в сечениях l_8 и l_9 , рис. 5) был установлен тарированный пятиточечный шаровой зонд с координатным устройством. Он позволял измерять параметры потока в трех измерениях. Зонд представляет собой шарик диаметром 5 мм с пятью отверстиями диаметром 0,8 мм. Одно отверстие центральное, четыре других расположены попарно в вертикальной и горизонтальной плоскостях под углом 45° к центральной оси. На координатном устройстве был предусмотрен нониус, поэтому кроме замера полного давления p_2^* за рабочим колесом замерялся угол выхода потока в абсолютном движении α_2 . В диапазоне изменения чисел Маха $M=0,2...1$ точность измерения углов выхода потока составляет $\pm 1...2^\circ$. Скорость потока определяется с погрешностью $\pm 3\%$.

При траверсировании поля на выходе из штатной турбины № 1 была обнаружена зона отрыва потока. Начало зоны отрыва по радиусу располагается примерно в том месте, где начинается втулка рабочего колеса. Зона отрыва определялась следующим образом: на ее границе полное давление, измеряемое шаровым зондом, сравнивалось с измеряемым статическим давлением, а угол выхода потока был близок к 0 или 180°. По изложенной методике нельзя точно измерить расположение зоны отрыва потока. Особую трудность при этом составляло определение угла потока, поскольку вблизи зоны отрыва поворот зонда по углу в пределах $\pm 10^\circ$ не приводил к заметному изменению показаний зонда, по которым он устанавливался под заданный угол потока. Поэтому окончательное суждение о появлении зоны отрыва регистрировалось тогда, когда сравнивались полные и статические давления. Вблизи зоны отрыва, когда производились отмеченные выше повороты зонда в пределах $\pm 10^\circ$, измеряемое полное и статическое давления практически не изменялись.

Распределение полных и статических давлений в зависимости от радиуса выходного сечения рабочего колеса в турбине № 1 для режима № 2 ($p_0^*/p_2=1,285$, $n_{\text{рек}}=35000$ мин⁻¹) представлены на рис. 13. Из рис. 13 видно, что у втулочного сечения возникает отрывное течение. Граница зоны отрыва определялась по равенству полных и статических давлений.

Таким образом, сравнивая результаты расчета осесимметричного течения в турбине № 1 на режиме № 2 (рис. 5) с результатами эксперимента (рис. 13), приходим к выводу: наше предположение, основанное на результатах расчета, о том, что

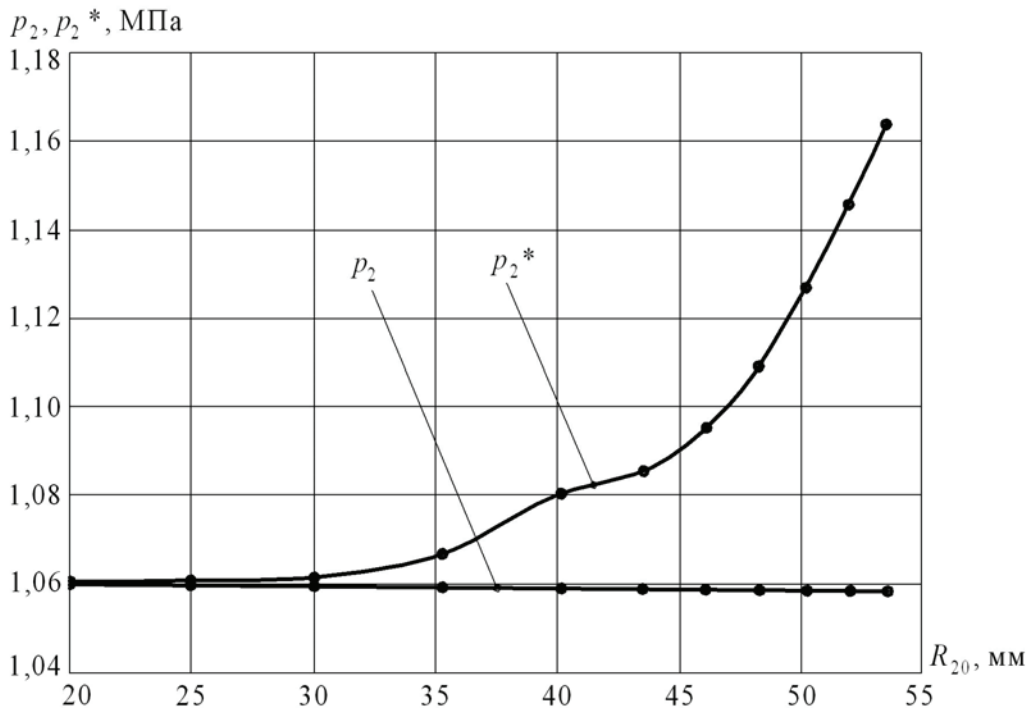


Рис. 13. Распределение полных и статических давлений на выходе из рабочего колеса турбины № 1 для режима № 2 ($p_0^*/p_2=1,285$, $n_k=35000$ мин⁻¹)

Fig. 13. Distribution of full and static pressure at the output from the driving wheel of the turbine № 1 for the mode № 2 ($p_0^*/p_2=1,285$, $n_k=35000$ мин⁻¹)

в турбине № 1 при работе на режиме № 2 возникает отрывное течение, нашло экспериментальное подтверждение.

Выводы

Результаты расчетных данных свидетельствуют о следующем:

1. С уменьшением степени понижения давления газа в ступени π_r происходит уменьшение перепада скорости Δw_s . Так, например, для турбины № 1 при переходе с расчетного режима № 1 ($\pi_r=1,485$) на расчетный режим № 2 ($\pi_r=1,285$) перепад скорости Δw_s уменьшился с $\Delta w_s=207,5$ до $\Delta w_s=171,3$ м/с.
2. С уменьшением степени понижения давления газа в ступени π_r может возникнуть отрывная зона. Так, например, для турбины № 1 при переходе с расчетного режима № 1 ($\pi_r=1,485$) на расчетный режим № 2 ($\pi_r=1,285$), предположительно, возникает отрывная зона. Граница отрывной зоны определена при условии $w_s=0$.
3. Сравнение результатов расчета осесимметричного течения с результатами эксперимента доказывает, что в турбине № 1 при работе на режиме № 2 ($\pi_r=1,285$) возникает отрывное течение.
4. Из анализа кривых изменения окружного КПД по высоте лопатки на выходе из рабочего колеса следует, что на графике можно выделить два характерных участка. Участок 1, на котором высота лопатки на выходе из рабочего колеса изменяется от $R_{20}=20$ до $R_{20}=42,5$ мм. Этот уча-

сток характерен тем, что на нем все три турбины развивают практически одинаковый окружной КПД. Участок 2, на котором высота лопатки на выходе из рабочего колеса изменяется от $R_{20}=42,5$ до $R_{20}=53,5$ мм. Этот участок характерен тем, что разница в определении окружного КПД начинает возрастать от нуля при высоте лопатки $R_{20}=42,5$ мм. Достигая высоты лопатки $R_{20}=53,5$ мм, окружной КПД турбины № 2 превышает КПД турбины № 1 на 5,42 %, окружной КПД турбины № 3 превышает КПД турбины № 1 на 7,58 %. Это можно объяснить следующим образом.

- На участке 1 общие потери в рабочем колесе практически одинаковые для всех трех турбин. На участке 2 общие потери в рабочем колесе для турбины № 1 начинают значительно превышать потери для турбин № 2 и 3.
 - Потери с выходной скоростью на участке 1 одинаковые для всех трех турбин. На участке 2 потери с выходной скоростью для турбины № 1 значительно превышают потери для турбин № 2 и 3.
- Осредненный по высоте лопатки окружной КПД: для турбины № 1 $\bar{\eta}_u=0,76$; для турбины № 2 $\bar{\eta}_u=0,781$; для турбины № 3 $\bar{\eta}_u=0,786$. Вот к такому повышению окружного КПД привело увеличение ширины колеса для турбин № 2 и 3.
5. Для штатной турбины № 1 отрывная зона возникает при степени понижения давления газа в ступени $\pi_r=1,285$, а для опытных турбин № 2 и 3

отрывная зона возникает при степени понижения давления газа в ступени $\pi_r=1,238$. Таким образом, за счет увеличенной ширины колеса B на 10 мм в опытных турбинах удалось сдвинуть отрывную зону в сторону меньших степеней понижения давления газа в ступени.

6. Судя по изменению окружного КПД вдоль выходного сечения рабочего колеса, рабочие колеса с меридиональными профилями, построенные по форме эллиптической кривой и по рекомендациям А.Н. Шерстюка, можно считать равноправными. Однако для турбины с обво-

дом, построенным по форме эллиптической кривой, изменение относительной скорости w вдоль внешней и внутренней линий меридионального обвода происходит плавней, чем для турбины с обводом, построенным по рекомендациям А.Н. Шерстюка. Геометрическое построение меридиональных обводов по эллиптической кривой – процесс гораздо менее трудоемкий, чем построение обводов по рекомендациям А.Н. Шерстюка. По этим причинам эллиптический обвод является наиболее приемлемым и его следует рекомендовать к применению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Feng Z.P., Deng Q.H., Li J. Aerothermodynamic design and numerical simulation of radial inflow turbine impeller for a 100 kW microturbine // Turbo Expo 2005: Power for land, sea, and air. – Nevada, 2005. – V. 1. – P. 873–880.
2. Experimental validation of an integrated optimization design of radial turbine for micro gas turbines / L. Fu, Z.P. Feng, G.J. Li, Q.H. Deng, Y. Shi, T.Y. Gao // Journal of Zhejiang university science. – March 2015. – V. 16. – Iss. 3. – P. 241–249.
3. Three-dimensional flow field measurements using LDV in the exit region of a radial inflow turbine / D.M. Murugan, W. Tabakoff, A. Hamed // Experiments in fluids. – May 1996. – V. 21. – Iss. 1. – P. 1–10.
4. Пассар А.В., Лашко В.А. Аналитический обзор методов расчета турбины на среднем радиусе // Справочник. Инженерный журнал. – 2013. – № S9. – С. 2–12.
5. Митрохин В.Т. Выбор параметров и расчет центробежной турбины на стационарных и переходных режимах. – М.: Машиностроение, 1974. – 228 с.
6. Шабаров А.Б., Тарасов В.В. К вопросу профилирования рабочего колеса центробежной турбины // Известия вузов. Машиностроение. – 1982. – № 1. – С. 101–105.
7. Шабаров А.Б., Тарасов В.В. Оптимальное проектирование проточной части радиально-осевой турбины // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 11. – С. 67–71.
8. Дорфман Л.А. Численные методы в газодинамике турбомашин. – Л.: Изд-во Энергия, 1974. – 272 с.
9. Основы работы в Ansys 17 / Н.Н. Федорова, С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захарова. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.
10. Басов К.А. ANSYS. Справочник пользователя / под ред. К.А. Басова. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 640 с.
11. Stolarski T., Nakasone Y., Yoshimoto S. Engineering analysis with ANSYS software. – Amsterdam: Elsevier, Academic Press, 2010. – 480 p.
12. Патанкар С.В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 312 с.
13. Сироткин Я.А. Расчет осесимметричного вихревого течения невязкой сжимаемой жидкости в радиальных турбомашинах // Известия академии наук СССР, Отделение технических наук, Механика и машиностроение. – 1963. – № 3. – С. 16–28.
14. Пассар А.В., Лашко В.А. Аналитический обзор пространственных методов расчета турбины // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2013. – № S9. – С. 13–24.
15. Пассар А.В. Исследование влияния степени радиальности на структуру потока в радиально-осевой турбине турбокомпрессора ТКР-18 // Машиностроение и инженерное образование. – 2016. – Т. 1. – № 1 (46). – С. 50–59.
16. Лашко В.А., Пассар А.В. Модель Я.А. Сироткина как инструмент для анализа геометрических параметров радиально-осевой турбины комбинированного двигателя // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 2008. – № 2. – С. 43–62.
17. Шерстюк А.Н., Зарянкин А.Е. Радиально-осевые турбины малой мощности. – М.: Машиностроение, 1976. – 208 с.
18. Wu Chung-Hua. A general theory of three-dimensional flow in subsonic and supersonic turbomachines of axial, radial and mixed-flow types // Trans. ASME. – 1952. – V. 74. – № 8. – P. 1363–1380.
19. Hawthorne W., Novak R. The aerodynamics of turbo-machinery // Annual review of fluid mechanics. – 1969. – V. 1. – № 4. – P. 341–366.
20. Binder F.S., Gulati P.S. A method for predicting the performance of centripetal turbines in non-steady flow // Turbocharg and turbochargers: Int. Conference. – London, 1978. – P. 233–240.
21. Киреев В.И., Пантелеев А.В. Численные методы в примерах и задачах. – СПб.: Изд-во «Лань», 2015. – 448 с.
22. Пассар А.В., Тимошенко Д.В. Исследование влияния степени радиальности на структуру потока в проточной части радиально-осевой турбины газотурбинной установки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 5. – С. 24–38.
23. Beam R.M., Warming R.F. An implicit factored scheme for the compressible Navier-Stokes equations // AIAA Journal. – 1978. – V. 16. – № 4. – P. 393–402.
24. Steger J.L. Implicit finite-difference simulation of flow about arbitrary two-dimensional geometries // AIAA Journal. – 1978. – V. 16. – № 7. – P. 679–686.
25. Pulliam T.H., Steger J.L. Implicit finite-difference simulation of three-dimensional compressible flow // AIAA Journal. – 1980. – V. 18. – № 2. – P. 159–167.
26. Chakravarthy S.R. Euler equation – implicit schemes and boundary conditions // AIAA Journal. – 1983. – V. 21. – № 5. – P. 699–706.
27. Зализняк В.Е. Численные методы. Основы научных вычислений. – М.: Изд-во «Юрайт», 2016. – 356 с.
28. Численные методы / У.Г. Пирумов, В.Ю. Гидаспов, И.Э. Иванов, Д.Л. Ревизников, В.Ю. Стрельцов, В.Ф. Формалев. – М.: Изд-во «Юрайт», 2016. – 422 с.
29. Betounes D. Partial differential equations for computational science analysis. – Hattiesburg: Springer-Verlag, 1998. – 530 p.
30. Hahn В.Н., Valentine D.T. Essential MATLAB for engineers and scientists. – Amsterdam: Elsevier, Academic Press, 2013. – 424 p.
31. Ревинская О.Г. Основы программирования в MATLAB. – СПб.: Изд-во «БХВ-Петербург», 2016. – 208 с.

Поступила 18.08.2017 г.

Информация об авторах

Пассар А.В., кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Численные методы математической физики» Вычислительного центра ДВО РАН.

UDC 621.43

INFLUENCE OF A MERIDIAN CONTOUR FORM IN A DRIVING WHEEL ON GAS FLOW PARAMETERS IN A RADIALY-AXIAL TURBINE OF A GAS-TURBINE PLANT

Andrey V. Passar,
passar_av@mail.ru

Computer center of Far East branch of the Russian Academy of Science,
Russia, 680000, Khabarovsk, street Kim U Chena 65.

The relevance of the research is caused by the necessity to improve a flowing part of a radial-axial turbine of new generation of gas turbine units, used in various industries. Microturbines (microturbines) with electrical power from 15 to 600 kW, using associated gas as the fuel, is a separate group of gas turbines of low power.

The aim of the research is to study the influence of a meridional contour of the impeller on gas flow structure in a flow path of the radial-axial turbine of a gas turbine installation. using the Ya.A. Sirotkin model for calculating axisymmetric vortex flow of inviscid compressible fluid in the flow path of the radial-axial turbomachines.

Research methods: the Ya.A. Sirotkin method to calculate axisymmetric vortex flow of inviscid compressible fluid in the flow path of the radial-axial turbomachines.

Results. The paper states the problems of selecting the meridional contour of the impeller radial-axial turbine and introduces impellers: standard turbine impellers with an elliptical meridional contour; impellers with meridional contour, built on the recommendations of A.N. Sherstyuk. The influence of the meridional contour of the impeller on gas flow structure in the flow path of the radial-axial turbine was shown. Based on the results of calculation of axisymmetric flow in impellers, the author has introduced the distributions of meridional velocities depending on a normal length and distribution of relative velocity along the meridional lines of the impeller perimeter. On the basis of these distributions the author defined the reverse current area. The paper introduces the results of calculation of surface currents. The boundary of the separated zone is defined under condition $w_5=0$. The paper introduces the experimental distribution of total and static pressures at the impeller exit of the standard turbine. The comparison of the calculation results of axisymmetric flow by the method of Ya.A. Sirotkin with the experimental results proves that in the turbine no. 1, when working in the mode no. 2, separated flow occurs. Based on the analysis of the circuit efficiency, averaged over the height of the blade, the turbine with an elliptical longitudinal contour is effective than a standard one by 2,1 %; the turbine with meridian contour, built on the recommendations of A.N. Sherstyuk, is more efficient than the standard one by 2,6 %.

Key words:

Meridian contour, radially-axial turbine, pump head coefficient, flow range, characteristics of a turbine, reactance degree, current line, gas-turbine plant.

REFERENCES

- Feng Z.P., Deng Q.H., Li J. Aerothermodynamic design and numerical simulation of radial inflow turbine impeller for a 100 kW microturbine. *Turbo Expo 2005: Power for land, sea, and air*. Nevada, 2005. Vol. 1, pp. 873–880.
- Fu L., Feng Z.P., Li G.J., Deng Q.H., Shi Y., Gao T.Y. Experimental validation of an integrated optimization design of radial turbine for micro gas turbines. *Journal of Zhejiang university science*, March 2015, Vol. 16, Iss. 3, pp. 241–249.
- Murugan D.M., Tabakoff W., Hamed A. Three-dimensional flow field measurements using LDV in the exit region of a radial inflow turbine. *Experiments in fluids*, May 1996, Vol. 21, Iss. 1, pp. 1–10.
- Passar A.V., Lashko V.A. Analytical review of methods for calculating turbine at the average radius. *Spravochnik. Inzhenerny zhurnal*, 2013, no. S 9, pp. 2–12. In Rus.
- Mitrokhin V.T. *Vybor parametrov i raschet tsentrostremitelnoy turbiny na statsionarnykh i perekhodnykh rezhimakh* [The choice of parameters and calculation of centripetal turbines in stationary and transient modes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 228 p.
- Shabarov A.B., Tarasov V.V. K voprosu profilirovaniya raboche-go koleasa tsentrostremitelnoy turbiny [On the issue of grading the impeller centripetal turbine]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 1982, no. 1, pp. 101–105.
- Shabarov A.B., Tarasov V.V. Optimalnoe proektirovanie protochnoy chasti radialno-osevoy turbiny [Optimal design of flowing parts of the radial-axial turbine]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 1988, no. 11, pp. 67–71.
- Dorfman L.A. *Chislennyye metody v gazodinamike turbomashin* [Numerical methods in gas dynamics of turbomachinery]. Leningrad, Energiya Publ., 1974. 272 p.
- Fedorova N.N., Valger S.A., Danilov M.N., Zakharova Yu.V. *Osnovy raboty v Ansys 17* [Basics in Ansys 17]. Moscow, DMK Press, 2017. 210 p.
- Basov K.A. *ANSYS. Spravochnik polzovatelya* [ANSYS. User manual]. Ed. by K.A. Basov. Moscow, DMK Press, 2014. 640 p.
- Stolarski T., Nakasone Y., Yoshimoto S. *Engineering analysis with ANSYS software*. Amsterdam, Elsevier, Academic Press, 2010. 480 p.
- Patankar S.V. *Chislennoe reshenie zadach teploprovodnosti i konvektivnogo teplotobmena pri techenii v kanalakakh* [Numerical solution of problems of thermal conductivity and convective heat transfer in the flow channels] Moscow, Izdatel'stvo MEI, 2003. 312 p.
- Sirotkin Ya.A. Raschet osesimmetrichnogo vikhrevogo techeniya nevyazkoy szhimaemoy zhidkosti v radialnykh turbomashinakh [Calculation of axisymmetric vortex flow of inviscid compressible fluid in radial turbomachines]. *Izvestiya akademii nauk SSSR, Otdelenie tekhnicheskikh nauk, Mekhanika i mashinostroenie*, 1963, no. 3, pp. 16–28.
- Passar A.V., Lashko V.A. Analytic review of spatial methods for calculating a turbine. *Spravochnik. Inzhenerny zhurnal s prilozheniem*, 2013, no. S9, pp. 13–24. In Rus.
- Passar A.V. Study the influence of radiality degree on flow structure in radial-axial turbine of gas generator TKR-18. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie*, 2016, vol. 1, no. 1 (46), pp. 50–59. In Rus.

16. Lashko V.A., Passar A.V. Ya.A. Sirotkin model as a tool for analyzing geometric parameters of radial-axial turbine in the compound engine. *Izvestiya VUZov. Mashinostroenie*, 2008, no. 2, pp. 43–62. In Rus.
17. Sherstyuk A.N., Zaryankin A.E. *Radialno-osevye turbiny maloy moshchnosti* [Radial-axial turbines of small capacity]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 208 p.
18. Wu Chung-Hua. A general theory of three-dimensional flow in subsonic and supersonic turbomachines of axial, radial and mixed-flow types. *Trans. ASME*, 1952, vol. 74, no. 8, pp. 1363–1380.
19. Hawthorne W., Novak R. The aerodynamics of turbo-machinery. *Annual review of fluid mechanics*, 1969, vol. 1, no. 4, pp. 341–366.
20. Binder F.S., Gulati P.S. A method for predicting the performance of centripetal turbines in non-steady flow. *Turbocharg and turbochargers: Int. Conference*. London, 1978. pp. 233–240.
21. Passar A.V., Timoshenko D.V. Research of radiality degree effect on stream structure in a flow range of radial-axial turbine in a gas-turbine plant. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. *Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 5, pp. 24–38. In Rus.
22. Kireev V.I., Panteleev A.V. *Chislennyye metody v primerakh i zadachakh* [Numerical methods in examples and problems]. St-Petersburg, Lan Publ., 2015. 448 p.
23. Beam R.M., Warming R.F. An implicit factored scheme for the compressible Navier–Stokes equations. *AIAA Journal*, 1978, vol. 16, no. 4, pp. 393–402.
24. Steger J.L. Implicit finite-difference simulation of flow about arbitrary two-dimensional geometries. *AIAA Journal*, 1978, vol. 16, no. 7, pp. 679–686.
25. Pulliam T.H., Steger J.L. Implicit finite-difference simulation of three-dimensional compressible flow. *AIAA Journal*, 1980, vol. 18, no. 2, pp. 159–167.
26. Chakravarthy S.R. Euler equation – implicit schemes and boundary conditions. *AIAA Journal*, 1983, vol. 21, no. 5, pp. 699–706.
27. Zaliznyak V.E. *Chislennyye metody. Osnovy nauchnykh vychislennykh* [Numerical methods. Fundamentals of scientific computing]. Moscow, Yurayt Publ., 2016. 356 p.
28. Pirumov U.G., Gidasov V.Yu., Ivanov I.E., Reviznikov D.L., Streltsov V.Yu., Formalev V.F. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Moscow, Yurayt Publ., 2016. 422 p.
29. Betounes D. *Partial differential equations for computational science analysis*. Hattiesburg, Springer-Verlag, 1998. 530 p.
30. Hahn B.H., Valentine D.T. *Essential MATLAB for engineers and scientists*. Amsterdam, Elsevier, Academic Press, 2013. 424 p.
31. Revinskaya O.G. *Osnovy programirovaniya v MATLAB* [The basics of programming in MATLAB]. St-Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2016. 208 p.

Received: 18 August 2017.

Information about the authors

Andrey V. Passar, Cand. Sc., senior researcher, Computer center of Far East branch of the Russian Academy of Science.

УДК 697.34

ВЫГЛУБЛЕНИЕ КАНАЛОВ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ – КЛЮЧ К ИХ ЭФФЕКТИВНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Чичерин Станислав Викторович,

man_csv@hotmail.com

Омский государственный университет путей сообщения,
Россия, 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Актуальность. Бедственное состояние объектов подземной инфраструктуры жизне- и ресурсообеспечения вынуждает производить постоянные вскрытия прокладки и замену отдельных элементов инфраструктуры на протяжении всего срока службы (до 25 лет). В качестве примера можно привести работы по эксплуатации сильно заглубленных каналов тепловых сетей, требующие значительных по размеру строительных площадок и применения специального оборудования (например, тяжелой строительной техники), рабочей силы и материалов, что делает характерной конструктивной особенностью тепловой сети глубину ее заложения.

Цель и задачи исследования. В настоящее время возникает множество проблем с теми участками системы тепловых сетей, при строительстве которых не выполнялись требования по выполнению мер, соответствующих геологическим условиям местности, в которой они были проложены. С целью решения этой проблемы требуется сопоставить практику заложения каналов тепловых сетей в 70–80-е гг. прошлого столетия и в настоящее время; определить факторы, влияющие на расположение отметки низа канала; обосновать необходимость выглубления каналов тепловых сетей; предложить дополнительные меры.

Методы. Автор руководствуется схемой системного подхода, что предопределило использование следующих методов: декомпозиции, связанной с изучением объектов исследования с точки зрения выделенных критериев (уровней заглубления и отметок), и практики организации эксплуатации теплосетевой инфраструктуры в условиях наличия проблемы грунтовых вод; обработки, анализа и синтеза полученных результатов; композиции, т. е. составления выводов, рекомендаций и заключения в целом.

Объектом исследования послужили: приложения к актам на осмотр тепломагистрالی в шурфе, рабочая и проектная документация омского предприятия магистральных тепловых сетей с акцентом на раздел профилей, включая отметки всех точек системы, величину ее уклона к низшим точкам, показанную в масштабе, все существующие и новые коммуникации с обозначением их фактического заглубления; отчеты по инженерно-геологическим изысканиям на объекты капитального строительства в г. Омске.

Результаты. Обращает на себя внимание участок канальной прокладки тепловой сети по ул. 8-я Ремесленная диаметром 1020 (!) мм, где глубина заложения составляет всего 0,3 м, что меньше нормативной величины. Отмечено, что происходит чрезмерное местное увеличение глубины заложения, приводящее не только к увеличению земляных работ, но и к усложнению дальнейшей эксплуатации, его причинами становится необходимость обеспечения минимальной величины уклона 0,002 при сохранении заглубления не менее 0,5 м в точке максимального подъема и наличие пересечения трассы тепловой сети другими коммуникациями. Таким образом, установлено, что отметка низа канала, как правило, мало зависит от диаметра и в большей степени определяется местными условиями нахождения участка тепловой сети. В городе Омске остро стоит проблема высокого уровня грунтовых вод. Положение уровня грунтовых вод относительно глубины прокладки труб тепловой сети также оказывает существенное влияние на скорость их коррозии. Наиболее неблагоприятным оказывается вариант, когда трубопроводы тепловых сетей проложены на уровне грунтовых вод и периодически подвергаются увлажнению. Принятые ранее решения о значительном заглублении тепловых сетей приводят к тому, что в условиях повсеместного отсутствия ливневой канализации теплофикационные каналы регулярно затопляются водой. К сожалению, в условиях плотной городской застройки и наличия большого числа смежных коммуникаций выглубить канал без их выноса не всегда возможно. Исследование показало, что практика заглубления каналов тепловых сетей более чем на 2 м, имевшая место в 70–80-е гг. прошлого столетия, не имеет широкого распространения в настоящее время.

Выводы. Следует еще раз поднять вопрос о пересмотре преимущественного положения «мягких» коммуникаций (электрические, телефонные и осветительные кабели) перед теплотрассой, особенно большого диаметра (от 500 мм), тем более в свете бедственного положения в вопросе реконструкции аварийных теплотрасс; продолжить рассматривать в качестве приоритетного мероприятия выглубление канала; в процессе производства ремонтных работ особое внимание уделять восстановлению и замене строительных конструкций каналов, устройству их гидроизоляции, а также нанесению антикоррозионных покрытий и покровного слоя теплоизоляции. Плита перекрытия канала тепловой сети может и должна служить основанием для дорожного покрытия тротуаров и автомобильных проездов, а не должна быть глубоко закопанной в землю.

Ключевые слова:

Теплоснабжение, трубопровод, глубина, отметка, грунт, уклон, бетонный канал, коммуникации, грунтовые воды, обслуживание, нормативные требования.

Введение

В настоящее время централизованные источники тепла выработали свой ресурс более чем на 70 %, а состояние тепловых сетей таково, что тепловые потери при транспортировке теплоносителя доходят до 20 % (при норме не более 5 %), а его утечки – 18–20 % (при норме 0,25 % от объема теплоносителя в системе). Неудовлетворительное состояние теплотрассовой инфраструктуры, кроме того, приводит к ежегодным плановым отклю-

чениям горячего водоснабжения [1]. Повреждаемость тепловых сетей уже превышает два повреждения на 1 км трассы, что увеличивает и без того большие эксплуатационные затраты. Анализ современного состояния тепловых сетей показывает, что резервы надежности теплоснабжения зависят от конструктивных особенностей тепловых сетей, их протяженности и качества эксплуатации [2]. Характерной конструктивной особенностью тепловой сети является глубина ее заложения.

В работе [3] эффективность эксплуатации напрямую увязывается с надежностью теплоснабжения. Обращается внимание на то, что нужно исключить халатность строительно-монтажных служб и повысить технический и культурный уровень специалистов, ответственных за приемку рабочей документации по проектам реконструкции или строительства новых тепловых сетей. Допущения инженеров-проектировщиков, разрабатывающих как план, так и профиль трассы, и монтажников, осуществляющих прокладку, могут привести к негативным последствиям, в том числе к снижению надежности функционирования объектов. Имеются теоретические исследования процессов теплопереноса в зонах размещения теплопроводов [4–6], однако авторы не связывают глубину заложения участка тепловой сети с возможными проблемами, возникающими при их эксплуатации.

Британские коллеги [7, 8] освещают вопрос расположения подземных коммуникаций, в частности глубины их заложения, с позиций необходимости использования туннелей и коллекторов для совместной прокладки трубопроводов тепловых сетей, водопровода, кабелей связи и силовых кабелей. Рассматривается ситуация в отдельных населенных пунктах применительно к уровню грунтовых вод и к проблеме возможного подтопления без акцента на системе централизованного теплоснабжения [9]. Публикация [10] также описывает способы защиты фундаментов любых объектов капитального строительства при высоком уровне грунтовых вод. Что касается сетей теплоснабжения, то связь между заглублением трубопроводов и интенсивностью их коррозии выявлена [11] и в других странах. Задолго до настоящего исследования предлагалось [12] в процессе производства ремонтных работ особое внимание уделять восстановлению и замене строительных конструкций каналов, устройству их гидроизоляции. Важность анализа состояния строительных конструкций тепловых сетей подчеркивается в источнике [13]. Исследованы системы теплоснабжения, в т. ч. технологии прокладки теплофикационных сетей, и в отдельно взятой стране, например в Швеции [14]. В научных публикациях также отражена связь между эффективностью их эксплуатации и процессом снятия/подключения отопительной нагрузки [15].

Цель настоящего исследования – решение одной из проблем современной промышленной теплоэнергетики: повышение эффективности работы и экономичности эксплуатации систем транспортировки тепловой энергии.

Задачи:

- сопоставить практику заложения каналов тепловых сетей в 70–80-е гг. прошлого столетия и в настоящее время;
- определить факторы, влияющие на расположение отметки низа канала;
- обосновать необходимость выглубления каналов тепловых сетей;
- предложить дополнительные меры.

Методы

Автор делает попытку руководствоваться схемой системного подхода [16], которая применительно к настоящему исследованию имеет следующий вид:

- 1) установление критериев оценки результатов [17];
- 2) идеализация: изучение существующих публикаций и нормативных документов;
- 3) разработка методов, в т. ч. терминологии исследования, и выбор его объектов;
- 4) декомпозиция, связанная с изучением объектов исследования с точки зрения выделенных критериев (уровней заглубления и отметок) и практики организации эксплуатации теплосетевой инфраструктуры в условиях наличия проблемы грунтовых вод;
- 5) обработка, анализ и синтез полученных результатов;
- 6) композиция, т. е. составление выводов, рекомендаций и заключения в целом.

Несмотря на не раз рассмотренные преимущества применения трубопроводов современного типа из предварительно (в заводских условиях) изолированных пенополиуретаном (ППУ) труб, выполненные оценки, показавшие меньшие общие приведенные затраты на предизолированные трубы в течение нормативного срока службы участка тепловых сетей, капитальные единовременные затраты на сооружение теплотрассы такого типа, все-таки остаются выше аналогичных затрат на привычную с советских времен конструкцию канальной прокладки. Этот фактор становится определяющим в условиях непрекращающегося финансового кризиса, хронической нехватки средств на реконструкцию и вызванной этим недозаменой и высокой повреждаемостью трубопроводов тепловых сетей.

Кроме того, применение предварительно изолированных труб в ППУ изоляции, уложенных непосредственно в грунт, ограничено и требованиями действующих правил. К примеру, в просадочных, засоленных и набухающих грунтах при подземной прокладке тепловых сетей бесканальную прокладку применять не допускается [18]. Совокупность информации обусловила выбор предмета настоящего исследования – тепловые сети канальной прокладки.

Объектом исследования послужили:

- приложения к актам на осмотр тепломагистралей в шурфе (фактические схемы сечения канала);
- рабочая и проектная документация оского предприятия магистральных тепловых сетей с акцентом на раздел профилей. В рассмотрение было взято более десяти комплектов рабочей документации, выполненных за последние четыре года; особое внимание обращалось на чертежи, предназначенные для производства строительно-монтажных работ (основной комплект рабочих чертежей марки ТС), и входящие в комплект профили сетей;

- отчеты по инженерно-геологическим изысканиям на объекты капитального строительства в г. Омске.

Шурфовкой называют обследование труб в местах контрольных вскрытий для определения фактического технического состояния трубопровода. Для этого используются различные методы диагностики, однако сразу следует указать на локальный характер этого подхода – глубина заложения и другие характеристики прокладки достоверно определяются лишь в одной точке [14]. В случае канальной прокладки заглублением тепловых сетей принято называть расстояние от поверхности земли или дорожного покрытия (кроме автомобильных дорог I, II и III категорий) до верха перекрытий каналов и тоннелей.

Результаты

Требования по проектированию тепловых сетей, сооружений на тепловых сетях во взаимосвязи со всеми элементами системы централизованного теплоснабжения установлены в Своде Правил [18]. Он предписывает при новом строительстве тепловых сетей принимать расстояния по горизонтали и вертикали от наружной грани строительных конструкций каналов и тоннелей до зданий, сооружений и других инженерных сетей по включенному в документ приложению (приложению А). При

прокладке теплопроводов по территории промышленных предприятий – по соответствующим нормам для промышленных предприятий.

Уменьшение нормативных указаний в приложении А возможно при обосновании и регламентируется постановлением Правительства Российской Федерации от 16 февраля 2008 г. N 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию» раздел I пункт 5. При реконструкции и капитальном ремонте тепловых сетей, при стесненных условиях строительства и сохранении границ охранной зоны тепловой сети возможно уменьшение нормативных расстояний до зданий, сооружений и инженерных сетей (приложение А) путем выполнения мероприятий по обеспечению сохранности существующих зданий, сооружений и инженерных коммуникаций (приложение Д).

Согласно приложению А, величину расстояния от поверхности земли или дорожного покрытия (кроме автомобильных дорог I, II и III категорий) до верха перекрытий каналов и тоннелей следует принимать не менее 0,5 м.

Изучение приложений к актам на осмотр тепломатриалы в шурфе показало, что на участках, первоначально смонтированных в 80-х гг. прошлого столетия, величина заглубления составляет не менее одного метра. Так, отметка низа ка-



Рис. 1. Прокладка трубопровода через зону зеленых насаждений с плитой перекрытия, находящейся на глубине около полуметра ниже уровня земли

Fig. 1. Routing of piping across a green space with a concrete cover about 0.5 m below surface-grade elevation

нала с учетом его высоты (1,2 и 1,6 м соответственно) находится на 2,2 м ниже отметки уровня земли на участке диаметром 820 мм между камерами V-C-ТК-21 и V-C-ТК-22 по ул. Тарской и на 2,6 м на участке диаметром 530 мм между камерами I-3-ТК-43 и I-3-ТК-45 (рис. 1).

Обращает на себя внимание участок канальной прокладки тепловой сети по ул. 8-я Ремесленная диаметром 1020 (!) мм, где глубина заложения составляет всего 0,3 м, что меньше нормативной величины.

Анализ современной рабочей и проектной документации омского предприятия магистральных тепловых сетей выявил, что в настоящее время отметка пола канала редко находится ниже отметки уровня земли более чем на 2 м. Так, в проекте технического перевооружения участка Северного луча г. Омска максимальная величина заглубления 1,34 м.

Существует два возможных объяснения такой величины заглубления:

- необходимость обеспечения минимальной величины уклона 0,002 при сохранении заглубления не менее 0,5 м в точке максимального подъема;
- наличие пересечения трассы тепловой сети кабелем городской электросети на глубине 0,7 м ниже уровня земли.

Происходит чрезмерное местное увеличение глубины заложения, приводящее не только к увеличению земляных работ, но и к усложнению дальнейшей эксплуатации [19]. Нормативный документ [18] требует, чтобы прокладка трубопрово-

дов тепловых сетей предусматривалась в одном ряду или над другими инженерными сетями. В то же время при подземной прокладке тепловые сети в случае пересечения с силовыми, контрольными кабелями и кабелями связи могут располагаться над или под ними, как в данном случае. Кроме того, пересечения с силовыми кабелями приводят к усилению процесса местной электрохимической коррозии (рис. 2).

Минимальное заглубление в упомянутом проекте технического перевооружения участка Северного луча находится вблизи правой границы проектирования и составляет всего 0,786 м.

Проект технического перевооружения участка по территории Онкологического диспансера диаметром 325 мм предполагает монтаж нижней отметки монолитного канала тепловой сети высотой 1,12 м на 1,8–2,1 м ниже уровня земли. Значение определено, исходя из требуемого уклона, однако в одном месте величина заглубления достигает 1,235 м, что связано с организацией пересечения с автомобильной дорогой при помощи бетонных разгрузочных плит. Как и выше, величина заглубления определялась вычитанием значений проектной или фактической отметки уровня земли (92,6 м) и отметки потолка канала (91,365 м).

В городе Омске остро стоит проблема высокого уровня грунтовых вод. Подземные воды типа поровых, безнапорных (грунтовых) на период взятых в рассмотрение инженерно-геологических изысканий встречены на глубине от 2,3 до 2,4 м от поверхности земли. Подземные воды, как правило,



Рис. 2. Место интенсивной коррозии вблизи точки пересечения с электрическим кабелем

Fig. 2. An electricity cable crossing with a supply pipe strongly affected by corrosion

приурочены к аллювиальным пластичным супесям. Водопор скважинами глубиной до 8 м не вскрыт. Тип режима подземных вод террасовый, способ питания преимущественно инфильтрационный и за счёт притока с гипсометрически вышерасположенных территорий, в связи с чем уровень подвержен природным сезонным и годовым колебаниям. По результатам многолетних наблюдений за режимом подземных вод в аналогичных условиях в разрезе года максимальный уровень подземных вод для ненарушенного гидрогеологического режима следует ожидать в мае, минимальный – в сентябре. Средняя годовая амплитуда колебания уровня на данном геоморфологическом элементе составляет 1,2 м. Положение уровня грунтовых вод относительно глубины прокладки труб тепловой сети также оказывает существенное влияние на скорость их коррозии. Трубы теплосетей изготавливаются из стали марок 17Г1С, 10 и 20, имеющих низкую коррозионную стойкость в традиционном диапазоне рабочих температур [20], а наиболее неблагоприятным оказывается вариант, когда трубопроводы тепловых сетей проложены на уровне грунтовых вод и периодически (в зависимости от времени года и погодных условий) подвергаются увлажнению [21]. Принятые ранее решения о значительном заглублении тепловых сетей приводят к тому, что в условиях повсеместного отсутствия ливневой канализации теплофикационные каналы регулярно затапливаются водой. В настоящее время уже на этапе проектирования [22] анализируется возможность выглубления канала и трубопроводов из зоны подтопления. К сожалению, в условиях плотной городской застройки и наличия большого числа смежных коммуникаций выглубить канал без их выноса не всегда возможно. Частично решает проблему более поверхностное заглубление тепловых сетей (до 0,3 м

на вводе тепловых сетей в здание. Крайней мерой может стать уменьшение при высоком уровне грунтовых вод величины заглубления каналов и тоннелей и расположение перекрытий выше поверхности земли на высоту не менее 0,4 м, если при этом не нарушаются условия передвижения транспорта [18].

Заключение

Практика заглубления каналов тепловых сетей более чем на 2 м, имевшая место в 70–80-е гг. прошлого столетия, не имеет широкого распространения в настоящее время. В целом отметка низа канала, как правило, мало зависит от диаметра и в большей степени определяется местными условиями нахождения участка тепловой сети.

Следует еще раз поднять вопрос о пересмотре преимущественного положения «мягких» коммуникаций (электрические, телефонные и осветительные кабели) перед теплосетью, особенно большого диаметра (от 500 мм), тем более в свете бедственного положения в вопросе реконструкции аварийных теплосетей [19]. Требуется продолжить рассматривать в качестве приоритетного мероприятия выглубление канала и предложить распространить данную практику в других теплосетевых организациях.

Дополнительной мерой может стать прокладка попутных дренажей и выпусков воды [23]. В процессе производства ремонтных работ особое внимание следует уделять восстановлению и замене стропильных конструкций каналов, устройству их гидроизоляции, а также нанесению антикоррозионных покрытий и покровного слоя теплоизоляции. Плита перекрытия канала тепловой сети может и должна служить основанием для дорожного покрытия тротуаров и автомобильных проездов, а не должна быть глубоко закопанной в землю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чичерин С. В., Лебедев В. М., Глухов С. В. Оценка потерь от ежегодных плановых отключений горячего водоснабжения в г. Омске // Энергетик. – 2017. – № 3. – С. 25–26.
2. Титов Г. И., Новопашина Н. А., Титов В. Г. Причины повреждаемости тепловых сетей // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. – 2016. – № 2 (23). – С. 19–22. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.02.4.
3. Обеспечение надежности тепловых сетей при проектировании новых объектов, реконструкции и авторском надзоре / Ю.В. Ваньков, В.И. Богаткин, У.Б. Учаров, Т.Г. Горбунова // Энергетика Татарстана. – 2011. – № 4 (24). – С. 52–55.
4. Половников В.Ю., Хузеев В.А. Численный анализ влияния промерзания грунта в зоне прокладки на тепловые потери бесканальных теплопроводов // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – № 2 (37). – С. 19–24.
5. Three-dimensional numerical model of heat losses from district heating network pre-insulated pipes buried in the ground / J. Danielewicz, B. Sniechowska, M.A. Sayegh, N. Fidorów, H. Jouhara // Energy. – 2016. – V. 108. – P. 172–184.
6. Половников В.Ю., Глазырин Е.С. Численный анализ влияния инженерных сооружений на тепловые потери бесканальных теплопроводов // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 2 (46). – С. 5–13.
7. Hunt D.V.L., Nash D., Rogers C.D.F. Sustainable utility placement via multi-utility tunnels // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2014. – V. 39. – P. 15–26.
8. Underground asset location and condition assessment technologies / S.B. Costello et al. // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2007. – V. 22. – № 5. – С. 524–542.
9. Софиенко Н.П., Рутман М.Г. Геоэкологические проблемы г. Омска. Подтопление // Материалы 57-й научно-технической конференции студентов и молодых ученых. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2003. – С. 211–215.
10. Some methods of protection of concrete and reinforcement of reinforced-concrete foundations exposed to environmental impacts / Z. Bonić et al. // Procedia Engineering. – 2015. – V. 117. – P. 419–430.
11. Duffy P.F. Underground district heating mains: Causes of failure // Building Services Engineering Research and Technology. – 1991. – V. 12. – № 3. – P. 111–113.
12. Скворцов А.А., Заверткин И.А. Повышение надежности конструкций подземных тепловых сетей. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 104 с.

13. Trends of European research and development in district heating technologies / M.A. Sayegh et al. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – V. 68. – P. 1183–1192.
14. Werner S. District heating and cooling in Sweden // Energy. – 2017. – V. 126. – P. 419–429.
15. Чичерин С.В. Планирование и оценка преимуществ увеличения нагрузки системы централизованного теплоснабжения // Вестник ВСГУТУ. – 2017. – № 2 (65). – С. 17–23.
16. Boulding K.E. General systems theory – the skeleton of science // Management science. – 1956. – V. 2. – № 3. – P. 197–208.
17. Lake A., Rezaie B., Beyerlein S. Review of district heating and cooling systems for a sustainable future // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – V. 67. – P. 417–425.
18. СП 124.13330.2012 Тепловые сети (актуализация СНиП 41–02–2003). – М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2012. – 52 с.
19. Степанова Г.А. Основные требования к проектам прокладки тепловых сетей из труб в ППУ-изоляции // Тепловые сети. Со-
временные практические решения: тр. Первой науч.-практ. конф. – М.: Новости теплоснабжения, 2005. – С. 19–23.
20. Чичерин С.В. Надежность и эффективность среднетемпературного теплоснабжения // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2017. – Т. 23. – № 2. – С. 75–80. DOI: 10.18721/JEST.230207.
21. Слепченко В.С. Опыт эксплуатации коммунального теплоэнергетического предприятия. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 266 с.
22. Жуков Д.В. Внедрение энергосберегающих мероприятий при проведении ремонта тепловых сетей АО «Омск РТС» // Повышение эффективности объектов теплоэнергетики и систем теплоснабжения: Межвуз. темат. сб. науч. тр. – Омск: Изд-во ОмГУПС, 2017. – 73 с.
23. Werner S. International review of district heating and cooling // Energy. – 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.045>.

Поступила 01.07.2017 г.

Информация об авторах

Чичерин С.В., аспирант кафедры теплоэнергетики Омского государственного университета путей сообщения.

UDC 697.34

UNLOCKING A POTENTIAL OF DISTRICT HEATING NETWORK EFFICIENT OPERATION AND MAINTENANCE BY MINIMIZING THE DEPTH OF A TRENCH SYSTEM

Stanislav V. Chicherin,
man_csv@hotmail.com

Omsk State Transport University,
35, Marx avenue, Omsk, 644046, Russia.

Relevance. The poor-quality of utilities causes the need to repeat excavation and reinstatement over their lifetime (up to 25 years) and therefore adds many longer-term costs relating to sustainability costs. For example, maintenance works are carried out within the deep-bury district heating networks therefore increasing significantly the size of working areas (above ground) and requirements for equipment (e.g. heavy machinery), labour and materials.

The aim of the research. Numerous problems are now encountered with such systems. Suitable design and installation guidelines were eventually developed which, when followed, gave no reasonable assurance of satisfactory service. In order to fill this need, we have undertaken a study to develop some guides for current systems.

Methods. We are reasonably aware of the key concepts of systems thinking to describe and understand the forces and interrelationships that shape the behavior of the system.

The object is appendixes related to inspection acts, projects of Omsk heat transmission enterprise with emphasis to the system layout profiles showing: all system stationing numbering, system slope drawn to scale to all low points, new and existing grade, all existing and new utilities shown at their actual burial depths; and a few detailed soil surveys made for capital projects in Omsk.

Results. Concrete trench floors shall be sloped at 2 meters in 1000 meter slope toward all low points to ensure proper drainage. This, and existing or new utilities at their actual burial depths lead to a low grade of buried systems. The grading design should ensure ground water will not pond or sit over the trench. The trench should not be routed through the existing flood plains, swales, or in areas where seasonal water are accumulated. In areas where seasonal ground water may cause a trench flotation problem, the design that will include a subdrainage system along the trench if thickening of the system walls and floor slabs to offset the buoyancy effect is not practical. The systems with the floor, usually about 2 meters below surface-grade elevation, emerged in the 1930s and dominated all new systems until the 1990s. Today, such systems are largely covered with soil and sloped independently of topography may be considered as an outdated technology.

Conclusions. It is an important challenge to gain the knowledge from placing electricity cables above district energy system and consequent catering disturbance claims for repeated excavation and reinstatement procedures. The installers of district heating should consider the location, spacing and depth of cover to avoid potential conflict with other existing underground apparatus. Heat distribution systems should be spaced to minimize the depth of the trench. The trench should be sealed to minimize the influx of ground water. Waterproof membranes should be placed in or below the concrete bottom slab and should be continued up the outer sides to the top of the sidewalls in accordance with the valve manhole guide specification. The top is constructed of reinforced concrete covers that protrude slightly above the surface and may also serve as a sidewalk.

Key words:

District heating, pipework, depth, grade, soil, slope, concrete trench, utility, ground water, operation, guidelines.

REFERENCES

- Chicherin S. V., Lebedev V. M., Glukhov S. V. Assessment of losses caused by annual routine domestic hot water interruptions: Omsk city. *Powerman*, 2017, no. 3, pp. 25–26. In Rus.
- Titov G.I., Novopashina N.A., Titov V.G. Causes of heat networks damageability. *Vestnik SGASU. Town Planning and Architecture*, 2016, no. 2 (23), pp. 19–22. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.02.4. In Rus.
- Vankov Yu.V., Bogatin V.I., Ucharov U.B., Gorbunova T.G. Ensuring the reliability of heat networks in the design of new facilities, reconstruction and supervision. *Energy Tatarstan*, 2011, no. 4 (24), pp. 52–55. In Rus.
- Polovnikov V.Yu., Huzeev V.A. Numerical analysis of the effect of freezing ground in the laying zone pads on heat loss of channel-less pipelines laid out without canals. *Inzenerno-Stroitel'nyj Zhurnal*, 2013, no. 2, pp. 19–24. In Rus.
- Danielewicz J., Śniechowska B., Sayegh M. A., Fidorów N., Jouhara H. Three-dimensional numerical model of heat losses from district heating network pre-insulated pipes buried in the ground. *Energy*, 2016, vol. 108, pp. 172–184.
- Polovnikov V.Yu., Glazyrin E.S. Numerical analysis of the impact of engineering constructions on heat loss of channel-free heat pipelines. *Magazine of Civil Engineering*, 2014, no. 2 (46), pp. 5–13. In Rus.
- Hunt D.V.L., Nash D., Rogers C.D.F. Sustainable utility placement via multi-utility tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, vol. 39, pp. 15–26.
- Costello S.B. Underground asset location and condition assessment technologies. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007, vol. 22, no. 5, pp. 524–542.
- Sofienko N.P., Rutman M.G. Geoekologicheskie problemy g. Omska. Podtoplenie [Omsk Geo Assets Issues. Flooding]. *Materialy 57 nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh* [Proc. of 57th conference for students and young scientists]. Omsk, SibADI Publ., 2003.
- Bonić Z. Some methods of protection of concrete and reinforcement of reinforced-concrete foundations exposed to environmental impacts. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 117, pp. 419–430.
- Duffy P.F. Underground district heating mains: causes of failure. *Building Services Engineering Research and Technology*, 1991, vol. 12, no. 3, pp. 111–113.
- Skvortsov A.A., Zaverkin I.A. *Povyshenie nadezhnosti konstruksiy podzemnykh teplovykh setey* [Improving the reliability of underground distribution system structure]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 104 p.
- Sayegh M.A. Trends of European research and development in district heating technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 68, pp. 1183–1192.

14. Werner S. District heating and cooling in Sweden. *Energy*, 2017, vol. 126, pp. 419–429.
15. Chicherin S. V. Planning and Assessment of Advantages of Increase in Loading of the Centralized Heat Supply System. *ESSUTM Bulletin*, 2017, vol. 65, no. 2, pp. 17–23. In Rus.
16. Boulding K.E. General systems theory – the skeleton of science. *Management science*, 1956, vol. 2, no. 3, pp. 197–208.
17. Lake A., Rezaie B., Beyerlein S. Review of district heating and cooling systems for a sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 67, pp. 417–425.
18. SP 124.13330.2012 «Teplovye seti» [SP 124.13330.2012. Thermal networks]. Moscow, Gosstroy Rossii, FGUP TSPP Publ., 2012. 52 p.
19. Stepanova G.A. Osnovnye trebovaniya k proektam prokladki teplovykh setey iz trub v PPU-izolyatsii [The main requirements for the projects of laying heat networks with pipelines in PUR-insulation]. *Teplovye seti. Sovremennye prakticheskie resheniya: trudy pervoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Thermal networks. Modern practical solutions. Proc. of the first scientific and practical conference]. Moscow, Novosti teplosnabzheniya Publ., 2005.
20. Chicherin S.V. The Reliability and Efficiency of Medium-Temperature District Heating. *St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 75–80. DOI: 10.18721/JEST.230207. In Rus.
21. Slepchenok V. *Opyt ekspluatatsii kommunalnogo teploenergeticheskogo predpriyatiya* [Experience in operation of utility thermal engineering plant]. St-Petersburg, PEIPK Publ., 2003. 266 p.
22. Zhukov D.V. Vnedrenie energosberegayushchikh meropriyaty pri provedenii remonta teplovykh setey AO «Omsk RTS» [Implementation of Energy Saving Measures for Repairs in Heat Networks at JSC «Omsk RTS»]. *Povyshenie effektivnosti obektov teploenergetiki i sistem teplosnabzheniya: Mezhvuzovskiy tematicheskyy sbornik nauchnykh trudov Omskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Enhancing the efficiency of Heat-and-Power Machinery, and District Heating Systems. Proc. of Scholar Papers of the Omsk State transport University]. Omsk, Omsk State Transport University Publ., 2017. pp. 39–47.
23. Werner S. International review of district heating and cooling. *Energy*, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.045>.

Received: 01 July 2017.

Information about the authors

Stanislav V. Chicherin, postgraduate, Omsk State Transport University.

УДК 553.461:553.08

МЕТАМОРФИЗМ И ТЕКТОНИКА: РОЛЬ В СТРУКТУРНО-ВЕЩЕСТВЕННОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ ХРОМШПИНЕЛИДОВ ИЗ УЛЬТРАМАФИТОВ

Юричев Алексей Николаевич,
juratur@sibmail.com

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

Актуальность работы обусловлена необходимостью выделения новых локальных критериев оценки в ультрамафитовых массивах офиолитовых комплексов потенциального хромитового оруденения, являющегося в настоящее время остродефицитным сырьем для России.

Цель работы: оценка характера воздействия регрессивного метаморфизма и пострудной тектоники на морфологическую сохранность хромитового рудного тела и его вещественный состав с целью последующего прогнозирования качества ожидаемого оруденения.

Методы исследования: изучение силикатных и рудных минералов в прозрачных шлифах и аншлифах на поляризационном микроскопе AxioScope Carl Zeiss; оценка химического состава хромшпинелидов на электронном сканирующем микроскопе Tescan Vega II LMU, оборудованном энергодисперсионным спектрометром (с детектором Si (Li) Standard) INCA Energy 350 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700.

Результаты. Критерии сохранности хромитового оруденения и его качественного состава определяются характером пострудных процессов метасоматизма и тектоники. Прогнозирование качества ожидаемого хромитового оруденения возможно только при одновременной оценке двух этих преобразующих агентов. Метасоматизм рудных хромшпинелидов обусловлен кинетическим фактором, выражающимся в снижении воздействия метаморфогенных процессов при увеличении густоты вкрапленности хромитового оруденения и размеров рудных тел. Густовкрапленные и сливные руды, целостность которых не нарушена тектоническим воздействием, практически полностью сохраняют свой качественный состав и промышленные свойства при любых степенях проявления метасоматизма. В противном случае происходит будинаж рудных тел, образование мелких разрозненных линз, раскалывание и дробление отдельных зерен и, как следствие всего этого, увеличение интенсивности их метаморфогенного преобразования (вынос Al, Mg и Cr и накопление Mn и Fe³⁺), вплоть до полной потери их промышленной ценности.

Ключевые слова:

Офиолиты, ультрамафиты, хромшпинелиды, метаморфизм, тектоника, химизм, структурные особенности.

Введение

Хром – необходимый компонент легированных сталей, которому нет замены. Добавка хрома к сталям придает им вязкость, повышает твердость и сообщает им антикоррозионные свойства. Хром дает ценные сплавы с никелем, кобальтом, алюминием, вольфрамом, молибденом (стеллиты). Большое значение имеет хромирование, т. е. покрытие тонким слоем хрома различных металлических изделий в целях борьбы с коррозией.

Объективно складывающиеся исторические события последних нескольких десятилетий привели к тому, что Россия лишилась большей части собственной хромовой рудно-сырьевой базы. До середины 90-х гг. прошлого века потребности черной металлургии в хромоворудном сырье удовлетворялись за счет поставок высококачественных руд Донского ГОКа Кемпирсайской группы месторождений (Южный Урал), однако после распада СССР данные месторождения территориально отошли Казахстану.

На сегодняшний день действующими являются предприятия, работающие на месторождениях Пермского края, – Главное Сарановское и Южно-Сарановское (Средний Урал), а также Ямало-Ненецкого автономного округа – месторождение Центральное (Полярный Урал). Однако добываемое хромоворудное сырье на данных месторождения не покрывает даже 1/10 части необходимой потребности ферросплавных заводов государства,

а минерально-сырьевая база хромоворудного сырья страны имеет тенденцию к устойчивому сокращению. Являясь одним из основных производителей и экспортеров феррохрома, Россия стала полностью зависимой от импорта, закупая основную часть сырья для его производства за рубежом, в основном в Казахстане и Турции.

Острая нехватка дефицитного стратегического сырья способствовала активизации в последние несколько десятилетий геологоразведочных работ на хром в России, а также разработке новых прогнозных критериев его поиска и оценки.

Выявление положения, прогнозирование размеров, морфологии и химического состава рудных тел в массивах конкретных формаций определяется локальными критериями прогноза, основанными на структурных, петрографических, петрохимических и минералогических особенностях данных массивов. В исследованиях нескольких последних десятилетий по вопросам хромитоносности ультрамафитов из офиолитовых комплексов неоднократно отмечалось, что химический состав хромшпинелидов подвержен закономерным изменениям в зависимости от размеров зерен и густоты их вкрапленности, а также характера пострудных процессов, затронувших массив ультрамафитов [1–6]. К таким пострудным преобразующим агентам относятся, в первую очередь, метаморфизм и тектоническое дробление.

С.В. Москалева [1] в своих исследованиях неоднократно рассматривала данные агенты в качестве главных факторов прогноза хромитонности территории, основываясь на том, что при интенсивном проявлении хотя бы одного из этих факторов хромовые руды разубоживаются и уничтожаются. Однако проведенные позднее исследования [2, 6–10] и результаты авторских наблюдений не позволяют категорично согласиться с таким выводом.

Исследование изменения состава хромшпинелидов от «свежих» образцов к полностью преобразованным, а также изучение зональных зерен шпинелидов ранее позволили проследить две эволюционные стадии их преобразования [3–7]. Первая стадия связана с высокобарическим динамометаморфизмом и включает в себя процессы деформаций, скупивания океанической литосферы и ее аккреции на пассивную окраину континента, в результате чего происходит формирование крупных тектонических пластин, распространение складчато-надвиговых и шарьяжных дислокаций, линейных зон высокобарического метаморфизма. На данной стадии происходит вынос из шпинелидов Al и Mg и накопление Cr, Fe и Mn.

В результате выноса из рудных хромшпинелидов магния и значительного количества алюминия увеличивается их железистость и хромистость. Содержание хрома в метаморфизованных хромшпинелидах может увеличиваться до 15 мас. % и достигать в рудах глиноземистого типа до 57 мас. %, а в рудах высокохромистого типа – до 64 мас. %. Таким образом, на первой стадии происходит естественное «облагораживание» хромшпинелидов. Развитие такого механизма «облагораживания» получило подтверждение экспериментальными исследованиями [11, 12], а также находками минералов высоких и сверхвысоких давлений (алмаз, карбиды кремния, псевдоморфы октаэдрического оливина, корунд, циркон, гранат и др.) в хромититах ультрамафитовых массивов Полярного Урала [13, 14].

Вторая стадия связана с наложенными метаморфическими процессами и приводит к преобразованию, перекристаллизации хромшпинелидов с выносом из них Al, Mg и Cr при накоплении Mn и окислении закисного железа в окисное. Качество (определяется содержаниями Cr_2O_3 , $FeO^* = FeO + 0,9 \times Fe_2O_3$ и SiO_2) вкрапленных хромовых руд ухудшается вследствие образования на месте хромита его железистых разновидностей (феррохромит, хроммагнетит) и хлорита, вплоть до полной потери их промышленной ценности.

Однако вопрос тождественности степени воздействия наложенных эпигенетических процессов на акцессорные и рудные хромшпинелиды, а также оценка факторов, отвечающих за интенсивность преобразования их химических составов, освещены в геологической литературе неоднозначно и остаются дискуссионными.

В настоящей статье представлены авторские наблюдения по данному вопросу.

Метаморфизм и тектоника

Метаморфизм. Широко проявлен в ультрамафитах офиолитовых комплексов. Последовательность метаморфизма, накладывающегося на деформированные в сухих условиях ультрамафиты, трактуется разными авторами неоднозначно. И.С. Чащухин считает, что вторичные преобразования реститовых ультрамафитов связаны как с ранней регрессивной, так и поздней наложенной прогрессивно-регрессивной стадиями метаморфизма. При этом регрессивная гидратация протекает в восстановительных условиях, начинаясь тремолитизацией и заканчивая ранней петельчатой серпентинизацией, а прогрессивный метаморфизм происходит в окислительных условиях с дальнейшими этапами серпентинизации вплоть до полного замещения оливина и энстатита серпентином [15]. Альтернативная точка зрения, сформулированная В.Н. Пучковым и Н.В. Вахрушевой, предполагает проявление единого непрерывного регрессивного этапа метаморфизма, завершающегося петельчатой серпентинизацией [15, 16].

Для оценки воздействия эпигенетических процессов на химический состав хромшпинелидов были отобраны и изучены «свежие» и интенсивно серпентинизированные образцы ультрамафитов с акцессорной и рудной минерализацией (таблица). Для прослеживания изменения качественного состава сливных руд образцы последних выбирались из линз, расположенных среди неизмененных (слабо измененных) дунитов и серпентинитов.

Полученные результаты позволяют отметить, что химический состав акцессорных хромшпинелидов и бедновкрапленных руд под воздействием вторичных процессов достаточно интенсивно изменяется путем выноса из них Al, Mg и Cr при накоплении Fe^{3+} и Mn, вплоть до полного образования на их месте магнетит-хлоритового агрегата. Однако при увеличении густоты вкрапленности, начиная со средневкрапленных руд, степень преобразования химического состава хромшпинелей существенно понижается и выражается в приобретении зернами в краевых частях узких хроммагнетитовых (магнетитовых) кайм, мощность которых может возрастать при увеличении интенсивности воздействия вторичного процесса или числа стадий такого воздействия (рис. 1). Отмечено, что для одинаковых по густоте вкрапленности хромититов степень преобразования зерен будет определяться их гранулометрией: чем крупнее размерность зерен хромшпинелидов, тем больше сохраняется полезной неизменной центральной части зерна, так как кайма замещения у таких зерен имеет такую же ширину, как и у зерен с меньшим размером.

Таким образом, благоприятным для обнаружения значительных концентраций полностью сохраненных высококачественных хромитовых руд всех структурных типов является отсутствие или слабое проявление наложенных вторичных преобразований – диопсидизации, фельдшпатизации,

Таблица. Химический состав рудных и аксессуарных хромшпинелидов из реститовых ультрамафитов, мас. %
Table. Chemical composition of ore and accessory chromspinelides from restite ultramafites, wt. %

Массив Massif	Тип минерализации Type of mineralization	Степень изменения породы Degree of change in rock	Содержание элемента, мас. %/Content of element, wt. %									
			MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO*	ZnO	NiO	
Харчерузский (Полярный Урал) Kharcheruzsky (Polar Urals)	Рудная (густовкрапленные и сливные руды) Ore (densely disseminated and massive ores)	«Свежая» Unchanged	8,31	5,08	0,19	0,22	62,27	0,49	23,18	0,18	0,07	
			8,05	4,41	0,19	0,15	63,38	0,62	23,12	0,03	0,06	
			9,38	6,93	0,05	0,03	60,89	0,33	22,21	–	0,17	
			9,64	7,00	0,10	0,08	60,99	0,50	21,40	0,08	0,21	
			7,93	6,19	0,06	0,16	62,60	0,80	22,11	0,06	0,08	
		7,35	5,84	–	0,08	62,42	0,60	23,60	0,03	0,08		
		8,00	6,20	0,03	0,07	61,21	0,48	23,86	0,06	0,08		
		6,19	5,16	0,04	0,20	62,67	0,59	24,82	0,14	0,18		
		6,43	5,50	0,02	0,09	63,45	0,51	23,79	0,15	0,07		
		6,98	11,93	–	–	53,79	–	26,81	0,52	–		
	3,54	1,58	0,36	0,48	61,89	–	31,63	0,45	–			
	3,77	2,05	0,54	0,62	55,81	–	36,98	0,47	–			
	5,21	3,21	0,43	0,65	54,89	–	35,36	0,47	–			
	2,43	0,45	1,12	0,48	19,08	0,67	75,87	–	0,57			
	2,71	0,93	1,71	–	9,24	1,11	84,10	–	0,51			
	0,81	0,91	2,00	0,65	10,02	–	86,29	–	–			
	3,80	1,45	1,00	0,41	25,41	–	67,37	–	0,67			
	–	–	–	0,94	7,40	0,48	91,42	–	–			
	Сыум-Кеу (Полярный Урал) Syum-Keu (Polar Urals)	Рудная (густовкрапленные и сливные руды) Ore (densely disseminated and massive ores)	«Свежая» Unchanged	12,43	7,02	0,17	–	59,81	–	19,92	–	–
				12,1	8,61	0,33	–	55,17	–	22,91	–	–
12,08				6,37	0,1	–	60,6	–	20,22	–	–	
12,85				6,41	0,13	–	61,13	–	18,87	–	–	
12,55				7,29	0,15	–	59,28	–	20,04	–	–	
Центр зерна / Center of grain												
11,26			8,1	0,17	–	56,09	–	23,56	–	–		
10,28			9,02	0,15	–	55,07	–	24,71	–	–		
10,21			9,99	0,2	0,17	59,17	0,08	19,79	0,1	0,06		
11,98			6,77	0,14	–	59,81	–	20,66	–	–		
Кайма замещения / Border of substitution												
9,84		2,77	0,21	–	28,02	–	54,92	–	–			
11,52		4,77	0,95	–	40,51	–	39,53	–	–			
8,73		11,44	0,44	–	46,72	–	31,46	–	–			
8,1		15,72	0,33	–	40,26	–	34,23	–	–			
7,28		11,08	0,41	–	47,6	–	32,53	–	–			
11,25		15,07	0,10	0,30	50,62	0,27	22,13	0,14	0,12			
10,28		19,46	0,25	–	49,14	–	20,60	0,19	0,07			
4,76		10,96	0,58	–	56,98	0,70	25,85	–	0,17			
10,96		17,27	0,32	0,08	47,93	0,29	23,01	0,06	0,07			
11,62	18,48	0,36	0,10	47,43	0,16	21,66	0,08	0,11				
2,20	0,16	0,73	0,16	24,06	0,41	71,99	0,07	0,22				
2,78	0,41	0,58	0,20	29,43	0,46	65,69	0,19	0,26				
0,85	0,05	0,60	0,19	6,65	0,11	91,21	0,05	0,28				
1,11	0,08	0,73	0,25	12,60	0,25	84,52	0,08	0,36				
1,26	0,06	0,52	0,22	9,01	0,17	88,21	0,11	0,44				
Калнинский (Западный Саян) Kalminsky (Western Sayan)	Рудная (густовкрапленные руды) Ore (densely disseminated ores)	«Свежая» Unchanged	11,06	13,08	–	–	54,52	–	21,34	–	–	
			11,16	13,23	–	–	55,08	–	20,53	–	–	
			12,05	13,96	–	–	53,37	–	20,62	–	–	
			12,39	13,45	–	–	54,43	–	19,73	–	–	
			10,59	9,91	–	–	58,28	–	21,22	–	–	
	9,78	13,32	–	–	52,88	–	24,02	–	–			
	9,93	12,82	–	–	53,58	–	23,66	–	–			
	9,1	12,49	–	–	54,9	–	23,49	–	–			
	9,76	12,98	–	–	53,54	–	23,72	–	–			
	11,54	13,07	–	–	54,67	–	20,71	–	–			
Агардагский (Тыва) Agardagsky (Tuva)	Рудная (сливные руды) Ore (massive ores)	«Свежая» Unchanged	10,70	8,50	0,14	0,12	64,72	0,54	15,30	–	–	
			12,38	9,73	–	0,17	62,32	0,25	14,89	0,12	–	
			15,90	12,44	–	–	57,64	0,33	13,31	–	0,18	
			11,99	14,15	0,11	0,17	58,00	0,35	14,71	–	0,31	
	13,46	15,75	–	0,19	55,72	0,28	14,18	0,13	–			
	12,19	7,81	0,08	0,11	63,97	–	15,55	0,12	–			
	13,72	13,23	0,11	0,18	57,87	0,34	14,34	0,20	–			

Окончание таблицы

Table

Массив Massif	Тип минерализации Type of mineralization	Степень изменения породы De- gree of change in rock	Содержание элемента, мас. %/Content of element, wt. %									
			MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO*	ZnO	NiO	
Идарский (Восточный Саян) Idarsky (Eastern Sayan)	Акцессорная Accessory	«Свежая» Unchanged	6,97	19,72	–	0,42	42,04	0,58	29,23	0,99	0,05	
			7,47	20,47	–	0,35	42,88	0,43	27,56	0,75	0,10	
			6,21	17,19	–	0,17	44,96	0,68	29,81	0,94	0,03	
			5,43	14,93	0,04	0,39	46,31	0,83	30,91	1,15	–	
			6,92	21,25	–	0,55	40,99	0,73	28,52	1,00	0,04	
		Измененная Changed	0,76	0,42	1,52	0,52	25,18	0,87	69,89	0,25	0,59	
			0,54	2,10	–	0,16	13,47	0,32	82,98	–	0,43	
			1,08	0,25	1,41	0,30	17,25	0,37	79,23	–	0,11	
			0,95	0,49	1,51	0,41	15,79	0,44	79,83	–	0,58	
			0,81	–	0,10	0,11	2,79	0,26	95,93	–	–	

Примечание. Диагностика химического состава хромшпинелидов выполнена методом рентгеноспектрального микроанализа [17] на электронном сканирующем микроскопе «Tescan Vega II LMU», оборудованном энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700 в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» ТГУ (г. Томск), аналитики А.С. Кульков, О.В. Бухарова.

Note. Diagnostics of chemical composition of chromospinelides was performed by X-ray spectral microanalysis [17] on electron scanning microscope «Tescan Vega II LMU» equipped with energy-dispersive spectrometer (with detector Si (Li) Standard) INCA Energy 350 and wave-dispersive spectrometer INCA Wave 700 at TPU «Analytic center of natural system geochemistry» (Tomsk), operators are A.S. Kulikov, O.V. Bukharova.

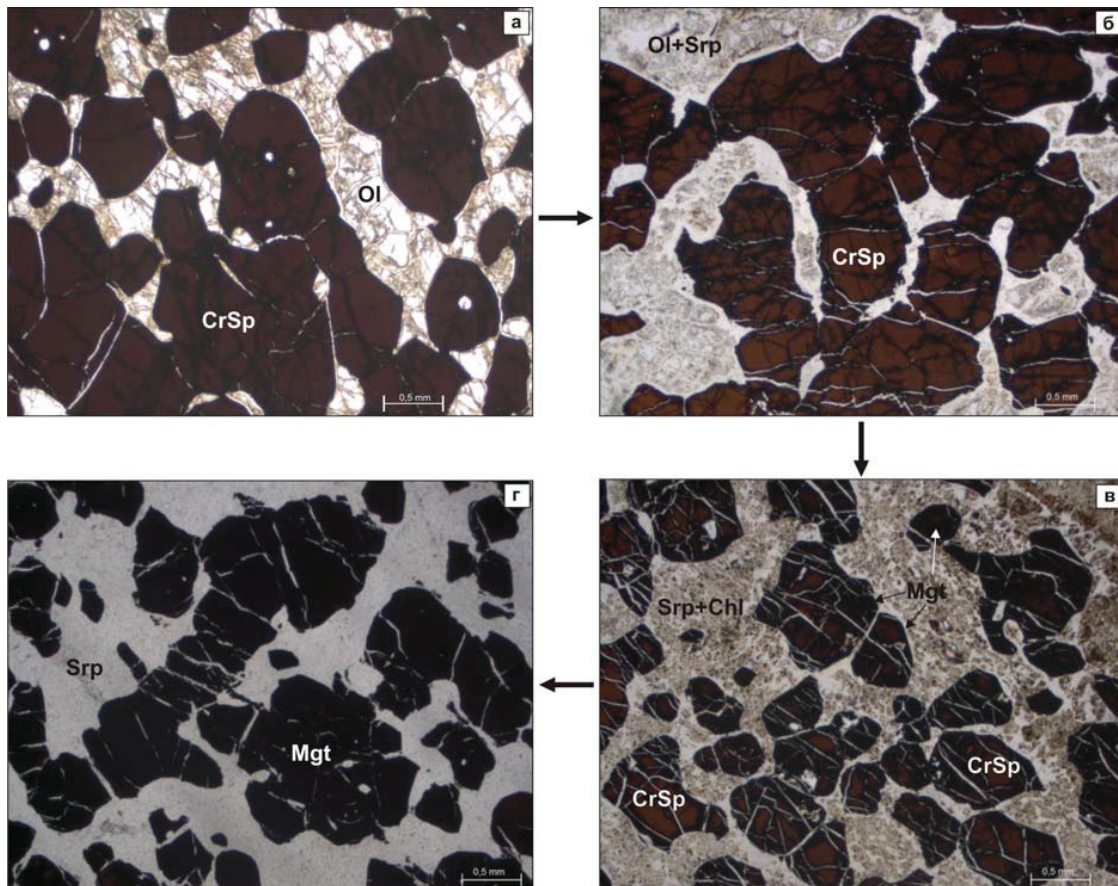


Рис. 1. Среднекрупные хромиты из Калнинского ультрамафитового массива (Западный Саян, Красноярский край). Показано изменение химического состава хромшпинели по мере возрастания интенсивности серпентинизации породы и степени ее тектонического дробления. Вишнево-красные, буро-коричневые хромиты замещаются железистыми разновидностями (феррохромит, хроммагнетит, магнетит) черного цвета. Ol – оливин; Srp – серпентин; Chl – хлорит; CrSp – хромшпинель; Mgt – магнетит (хроммагнетит)

Fig. 1. Medium-sized chromitites from Kalninsky ultramafic massif (Western Sayan, Krasnoyarsk Territory) with increase in degree of tectonic crushing (in transmitted light). The change in chemical composition of chromospinel with increasing intensity of serpentinization of rock and degree of its tectonic crushing is shown. Cherry-red and brown chromites are replaced by ferrous varieties (ferrochromite, chromium magnetite, magnetite) in black color. Ol – olivine; Srp – serpentine; Chl – chlorite; CrSp – chromospinel; Mgt – magnetite (chrommagnetite)

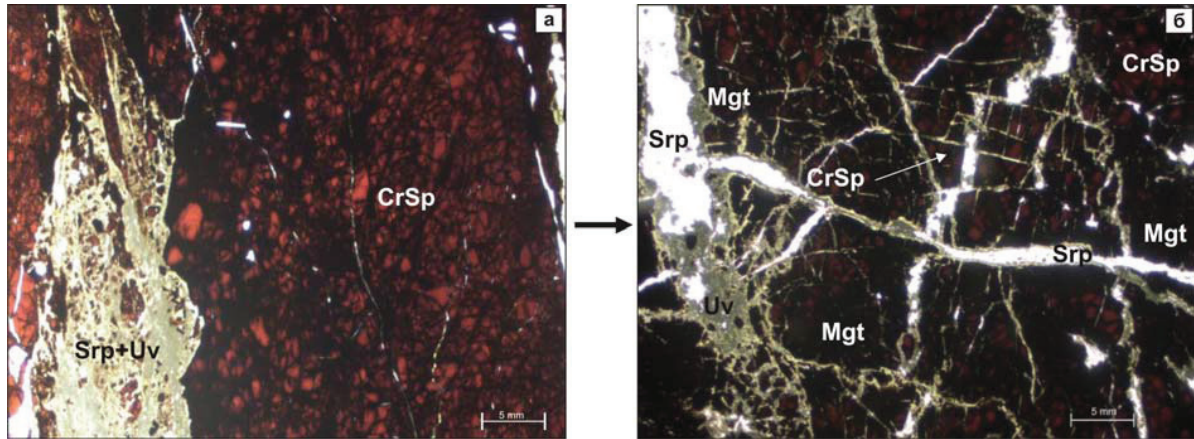


Рис. 2. Линзочки сливных хромшпинелидов, выявленные среди дунитов Агардагского ультрамафитового массива (республика Тыва): а) целостность рудного тела не нарушена тектоническим воздействием; б) рудное тело испытало тектоническое дробление и растаскивания на отдельные субблоки. CrSp – хромшпинель; Mgt – магнетит (хроммагнетит); Srp – серпентин; Uv – уваровитовый гранат

Fig. 2. Lenses of massive chromospinelides found among dunites of Agardagsky ultramafic massif (the Republic of Tyva): a) integrity of ore body is not disturbed by tectonic action; б) ore body was subjected to tectonic crushing and tearing to separate sub-blocks. CrSp – chromospinel; Mgt – magnetite (chrommagnetite); Srp – serpentine; Uv – uvarovite garnet

серпентинизации антигоритовой фации, хлоритизации. В ином случае интенсивное развитие данных процессов приводит к полному разубоживанию аксессуарных и бедновкрапленных рудных хромшпинелидов и частичному (за счет кайм замещения) снижению качества средневкрапленных рудных хромшпинелидов. Преобразование химического состава густовкрапленных и сливных руд, целостность которых не нарушена тектоническим воздействием, выражается только в незначительном повышении магнетитового минала в краевых частях рудных тел. Они полностью сохраняют свой качественный состав и технологические (комплекс химических, структурно-текстурных, физически и физико-химических особенностей руды, определяющих эффективную технологию ее обогащения) свойства (рис. 2, а).

Тектоника. Отмечено, что степень метаморфогенного преобразования хромовых руд и, как следствие, их разубоживание резко возрастают при интенсивном тектоническом дроблении маломощных рудных тел, особенно сложенных бедно-средневкрапленными рудами (рис. 1, 2). Данный процесс сопровождается будинажем рудных тел и образованием мелких разрозненных линз.

При оценке потенциальной локализации хромитовых линз (жил) в исследуемом геологическом объекте, а также выяснения роли и интенсивности тектонического воздействия на рудное тело успешно показали себя методы микроструктурного анализа оливина и пироксенов [18–22]. Однако число работ, посвященных изучению собственно микроструктур хромшпинелидов, формирующихся под воздействием пластических деформаций и тектонического преобразования, невелико [15, 23–26]. Вместе с тем подобные исследования для ряда других рудных минералов оказались весьма информативными при расшифровке генезиса и метаморфизма

медноколчеданных руд [27]. Пример данных исследований наводит на мысли о необходимости детального изучения морфологических и микроструктурных особенностей рудных хромшпинелидов.

Предварительно проведенные исследования в полированных аншлифах показывают, что тектоническое воздействие проявляется не только в преобразовании морфологии массивных рудных тел (будинаж, образование мелких разрозненных линз), но и в изменении морфологии отдельных зерен хромшпинелидов. Наиболее хорошо данные преобразования наблюдаются от средневкрапленных руд и гуще. При этом контакты тектонически ненарушенных и субпараллельно растресканных зерен хромшпинелида детально прослеживаются (рис. 3). Это обстоятельство, при условии отбора ориентированных образцов, позволяет отследить направленность развития тектонических преобразований в исследуемом массиве на микроуровне.

Отдельные зерна хромшпинелидов в таких тектонических зонах частично раскалываются и дробятся вследствие взаимного соударения и проворота. Как следствие всего этого в последующем происходит «растаскивание» по трещинкам отдельных фрагментов зерен и увеличение интенсивности их метаморфогенного преобразования, сопровождаемого выносом Al, Mg и Cr при накоплении Mn и Fe³⁺.

Обсуждение результатов и выводы

Таким образом, критерии сохранности хромитового оруденения и его качественного состава определяются характером пострудных процессов, к главным из которых относятся пострудная тектоника и вторичные преобразования.

Автор работы, при погружении в проблематику поставленного вопроса и изучении геологической литературы, обратил внимание, что часто боль-

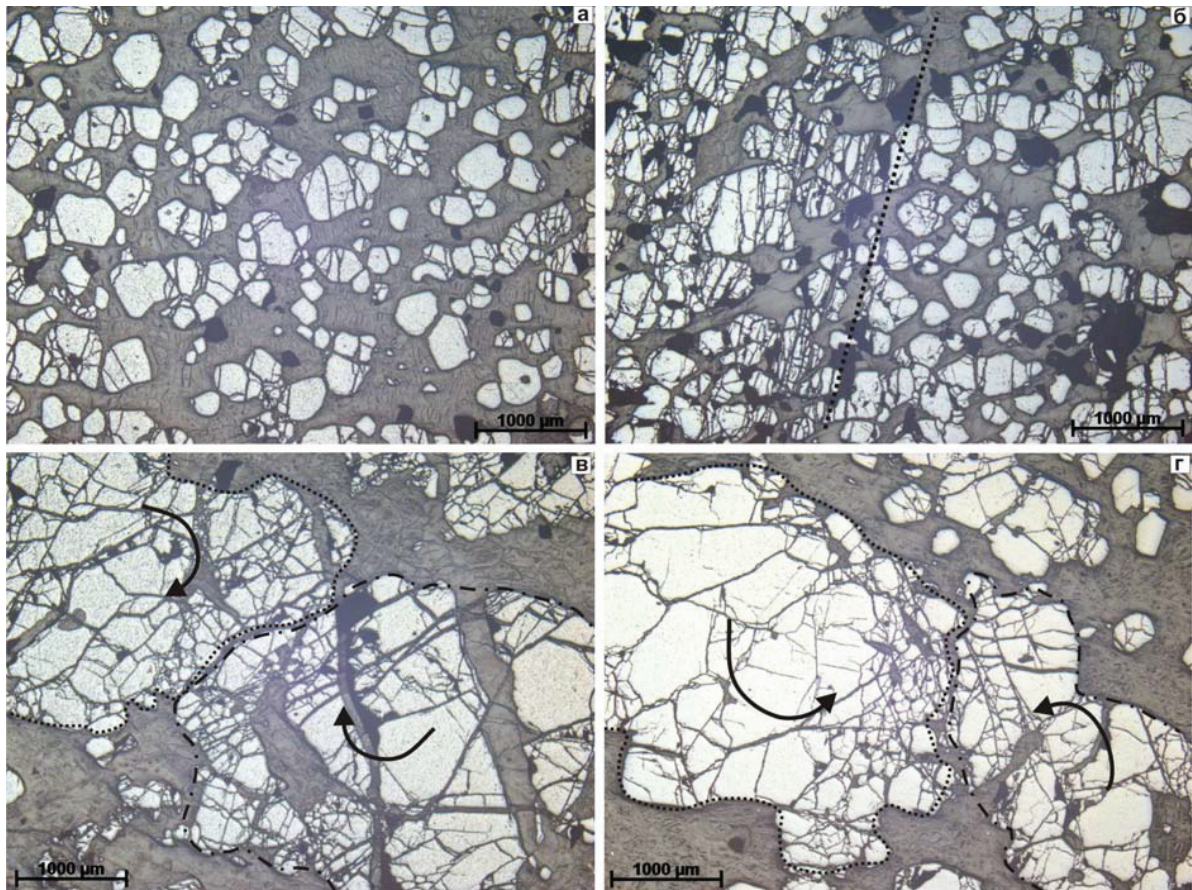


Рис. 3. Среднекрупные хромититы из Кемпирсайского массива (Южный Урал, Западный Казахстан) (аншлифы): а) целостность зерен тектонически не нарушена; б) контакт тектонически ненарушенных и субпараллельно растресканных зерен хромшпинелида; в–г) взаимное дробление зерен хромшпинелидов в результате соударения друг с другом

Fig. 3. Medium-sized chromitites from Kempirsaysky massif (Southern Urals, Western Kazakhstan) (polished sections): а) integrity of grains is not tectonically broken; б) contact of tectonically undisturbed and subparallel cracked grains of chromospinelide; в–г) mutual crushing of grains of chromospinelide as result of collision with each other

шинство исследователей относит вторичные процессы преобразования хромшпинелидов и вмещающих их ультрамафитов к числу метаморфических. Однако в данном случае здесь необходимо говорить о неизохимическом метаморфизме, а именно – о метасоматозе, так как во всех рассмотренных случаях имеет место замещение одних минералов другими с изменением валового химического состава.

При этом автору близка концепция И.С. Чащухина [15] и он считает, что в процессе своего исторического развития ультрамафитовые массивы испытывают как раннюю регрессивную (метасоматическую) стадию, так и более поздние наложенные прогрессивно-регрессивные (метаморфически-метасоматические) стадии преобразования в ходе проявления более позднего магматизма. Процессы метасоматизма респитовых ультрамафитов в основном приводят к серпентинизации силикатной матрицы и преобразованию химического состава хромшпинелидов (вынос из них Al, Mg и Cr при накоплении Mn и окислении закисного железа в окисное). Высвобождаемые подвижные Al и Mg

уходят в серпентин, а Cr, как известно, является слабо подвижным. Однако, как показывают наблюдения, он может входить в кристаллическую решетку силикатов, при этом наиболее благоприятными условиями для этого являются наложенные метасоматические процессы. Под воздействием постмагматических пневматолитового-гидротермальных растворов происходит вынос элемента из хромшпинели и его локальная миграция с образованием хромсодержащих силикатов – преимущественно уваровитовых гранатов и хромовых хлоритов (кочубейта и кеммерерита) (рис. 2, б; рис. 4).

В силу своих физико-химических особенностей хром в гидротермальном процессе имеет повышенную инертность, что обуславливает отсутствие его выноса за пределы хромитовых линз и локальное перераспределение [28]. Данное обстоятельство объясняет тяготение показанных хромсодержащих силикатов к хромититам и их отсутствие в породах с маломощной вкрапленной хромитовой минерализацией, где гидротермы обогащены компонентами серпентинитов.

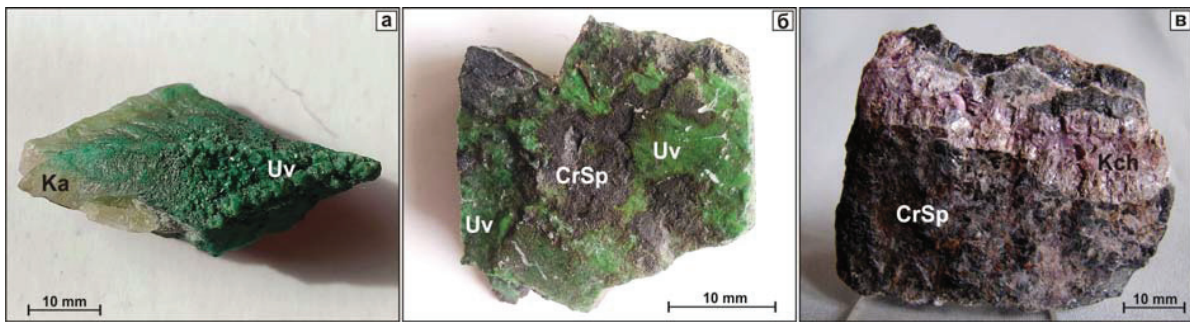


Рис. 4. Хромсодержащие силикаты из хромититов Агардагского ультрамафитового массива (республика Тыва): а) кристаллические выделения уваровита по кальцитовой жиле; б) агрегативные (пудра) выделения уваровитового граната в интерстициях между зернами хромшпинелида; в) жилка кочубеита (клинохлора розовато-сиреневого цвета) в густовкрапленном хромитите. Uv – уваровит; Kch – кочубеит; Ka – кальцит; CrSp – хромшпинель

Fig. 4. Chromium-containing silicates from chromitites of Agardagsky ultramafic massif (Republic of Tyva): а) crystalline secretions of uvarovite over calcite vein; б) aggregative (powder) secretions of uvarovite garnet in interstices between chromspinelides; в) vein of kochubeite (clinoclora of pinkish-lilac color) in densely disseminated chromitite. Uv – uvarovite; Kch – kochubeite; Ka – calcite; CrSp – chromspinel

Также автор не может однозначно согласиться с наблюдениями С.В. Москалевой [1], что при активном проявлении хотя бы одного из двух факторов (пострудной тектоники или метасоматических преобразований) хромовые руды разубоживаются и уничтожаются. Так, проявление интенсивного метасоматизма при отсутствии тектонического воздействия практически не оказывает никакого существенного воздействия на качественный состав и технологические свойства густовкрапленных и сливных рудных тел.

При существенном нарушении целостности рудного тела (растрескивание, растаскивание, будинаж) даже незначительные метасоматические преобразования могут привести к значимым ухудшениям его промышленного потенциала.

Такие наблюдения показывают, что прогнозирование качества ожидаемого хромитового оруденения возможно только при одновременной оценке

двух этих преобразующих агентов. Автор считает, что только синхронное интенсивное проявление как пострудной тектоники, так и метаморфогенных преобразований может привести к полному разубоживанию хромитового оруденения и выводит тектонический фактор в число наиболее значимых.

Исследование микроструктур хромшпинелидов позволяет оценить морфологическую сохранность рудного тела и его предварительный качественный состав. При этом хромитовые тела будут сохранять первоначальную форму в участках исследуемого объекта, не подвергшихся тектонической переработке, дроблению. В противном случае происходит будинаж рудных тел, образование мелких разрозненных линз, раскалывание и дробление отдельных зерен и, как следствие всего этого, увеличение интенсивности их метасоматического преобразования, вплоть до полной потери их промышленной ценности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москалева С.В. Гипербазиты и их хромитонность. – Л.: Недра, 1974. – 279 с.
2. Перевозчиков Б.В., Набиуллин В.И. Методические основы оценки ресурсного потенциала хромовых руд офиолитовых ультрабазитов // Вестник Пермского университета. Геология. – 2007. – № 4. – С. 91–105.
3. Юричев А.Н. Акцессорные шпинелиды из ультрамафитов: индикаторы условий формирования // Руды и металлы. – 2013. – № 6. – С. 30–34.
4. Макеев А.В., Брянчанинова Н.И. Топоминералогия ультрабазитов Полярного Урала. – СПб.: Наука, 1999. – 252 с.
5. Юричев А.Н. Калнинский ультрамафитовый массив Западного Саяна: рудная минерализация и ее генетическая природа // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 2. – С. 61–69.
6. Юричев А.Н. Критерии регионального и локального прогнозирования потенциальной хромитонности подформных ультрамафитовых массивов складчатых областей // Руды и металлы. – 2016. – № 3. – С. 5–14.
7. Перевозчиков Б.В., Плотников А.В., Макиев Т.Т. Природа вариаций состава рудной и акцессорной хромшпинели ультрабазитового массива Сыум-Кеу (Полярный Урал) // Известия вузов. Геология и разведка. – 2007. – № 4. – С. 32–39.
8. Юричев А.Н., Чернышов А.И., Кульков А.С. Рудная минерализация Агардагского ультрамафитового массива (Республика Тыва) // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 130–136.
9. Aswad K.J.A., Aziz N.R.H., Koyi H.A. Cr-spinel compositions in serpentinites and their implications for the petrotectonik history of the Zagros Suture Zone, Kurdistan Region, Iraq // Geological magazine. – 2011. – V. 148. – P. 802–818.
10. О явлениях метаморфизма хромшпинелида хромовых руд на примере Урала. Верхне-Уфалейская группа месторождений и Качкинское месторождение / О.А. Толканов, В.П. Чернобровин, В.Н. Ослоповских, А.В. Речкалова, И.Ю. Пашкеев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2005. – № 3. – С. 3–12.
11. Turkin A.I., Sobolev N.V. Pyrope-knorringite garnets: overview of experimental data and natural paragenesis // Russian Geology and Geophysics. – 2009. – V. 50. – № 12. – P. 1169–1182.

12. Garnet-spinel-olivine-orthopyroxene equilibria in the FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-Cr₂O₃ system: I. Composition and molar volumes of minerals / G.P. Brey, A.M. Doroshev, A.V. Gurnis, A.I. Turkin // Eur. J. Mineral. – 1999. – V. 11. – № 4. – P. 599–617.
13. Сустанов С.Г., Вахрушева Н.В. Хромовый рутил в хромититах Енгайской площади массива Рай-Из // Вестник Уральского отделения Российского минералогического общества. – 2010. – № 7. – С. 159–162.
14. Discovery of diamond and an unusual mineral group from the podiform chromite ore Polar Ural / J. Yang, W. Bai, Q. Fang, F. Meng, S. Chen, Zh. Zhang, H. Rong // Geology in China. – 2007. – V. 34. – P. 950–953.
15. Строение, эволюция и минерагения гипербазитового массива Рай-Из / под ред. В.Н. Пучкова, Д.С. Штейнберга. – Свердловск: УрО АН СССР, 1990. – 227 с.
16. Вахрушева Н.В. Метаморфизм хромитоносных гипербазитов Полярного Урала: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Екатеринбург, 1996. – 204 с.
17. Reed S.J.B. Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology. – N.Y.: Cambridge University Press, 2005. – 189 p.
18. Shmelev V.R. Mantle ultrabasites of ophiolite complexes in the Polar Urals: petrogenesis and geodynamic environments // Petrology. – 2011. – V. 19. – № 6. – P. 618–640.
19. Chernyshov A.I., Yurichev A.N. The Structural Evolution of Dunite and Chromite Ore from the Kharcheruz Massif, the Polar Urals // Geotectonics. – 2016. – V. 50. – № 2. – P. 196–208.
20. Savelyeva G.N., Suslov P.V. Structure and composition of mantle peridotites at the boundary with crustal complexes of ophiolites in the Syumkeu massif, Polar Urals // Geotectonics. – 2014. – Т. 48. – № 5. – С. 347–358.
21. Karato S-I. The Dynamic structure of the deep Earth. – Princeton: Princeton University Press, 2003. – 256 p.
22. Karato Sh.-I. Deformation of Earth Materials: an Introduction to the Rheology of Solid Earth. – Cambridge: Cambridge University Press, 2008. – 463 p.
23. Christiansen F.G. Deformation of chromite: S.E.M. Investigations // Tectonophysics. – 1986. – V. 121. – № 2–4. – P. 175–196.
24. Christiansen F.G. Deformation fabric and microstructures in ophiolitic chromitites and host ultramafics, Sultanate of Oman // Geol. Rundsch. – 1985. – V. 74. – № 1. – P. 61–76.
25. Biswajit G., Jyotiskanar R., Tomoaki M. Grain-scale plastic deformation of chromite from podiform chromitite of the Naga-Manipur ophiolite belt, India: Implication to mantle dynamics // Ore Geology Reviews. – 2014. – V. 56. – P. 199–208.
26. Ghosh, B., Konar, R. Textural developments in chromite deforming under eclogite-facies conditions from the Neoproterozoic Sittampundi anorthosite complex, Southern India // Geological Journal. – 2012. – V. 47. – P. 253–262.
27. Ярош П.Я., Буслаев Ф.П. Структуры руд и история формирования рудных агрегатов Узельгинского месторождения. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. – 99 с.
28. Тюлюпо Б.М. Рудные месторождения. Черные металлы. – Томск: Изд-во Томского университета, 1976. – 176 с.

Поступила 08.06.2017 г.

Информация об авторах

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

UDC 553.461:553.08

METAMORPHISM AND TECTONICS: THE ROLE IN STRUCTURALLY-COMPOSITIONAL TRANSFORMATION OF CHROMSPHINELIDES FROM ULTRAMAFITES

Alexey N. Yurichev,

juratur@sibmail.com

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

The relevance of the work is caused by the need to identify new local evaluation criteria of potential chromite mineralization, being currently scarce raw material for Russia, in ultramafic massifs of ophiolite complexes.

The main aim of the paper is to assess the nature of the effect of regressive metamorphism and post-ore tectonics on morphological safety of chromite ore body and its material composition for further predicting the quality of expected mineralization.

The methods used in the work: study of silicate and ore minerals in transparent sections and polished sections on the polarizing microscope AxioScope Carl Zeiss; evaluation of chemical composition of chromosphenelides on scanning electron microscope Tescan Vega II LMU, equipped with energy-dispersive spectrometer (detector Si (Li) Standard) INCA Energy 350 and wave-dispersive spectrometer INCA Wave 700.

The results. Criteria of preservation of chromite mineralization and its qualitative composition are determined by the nature of post-ore processes of metasomatism and tectonics. Forecasting the quality of expected chromite mineralization is possible only at simultaneous evaluation of these two converting agents. Metasomatism of ore chromosphenelides is caused by kinetic factor, which is manifested in decrease of intensity of metamorphogenic processes with increase in density of dissemination of chromite mineralization and in size of ore bodies. Densely embedded and massive ores, which integrity is not disturbed by tectonic action, almost completely retain their qualitative composition and industrial properties at any degree of metasomatic manifestation. Otherwise, the boudinage of ore bodies occurs, small scattered lenses are formed, individual grains are splitted and crushed and, as consequence, the intensity of their metamorphogenic transformation (removal of Al, Mg and Cr and accumulation of Mn and Fe²⁺) increases, up to the total loss of their industrial value.

Key words:

Ophiolites, ultramafites, chromosphenelides, metamorphism, tectonics, chemistry, structural features.

REFERENCES

1. Moskaleva S.V. *Giperbazity i ikh khromitunosnost* [Hyperbasites and their chromite-bearing properties]. Leningrad, Nedra Publ., 1974. 279 p.
2. Perevozchikov B.V., Nabiullin V.I. Methodical bases of estimation of resource potential of chrome ore from ophiolitic ultramafic rocks. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 2007, no. 4, pp. 91–105. In Rus.
3. Yurichev A.N. Accessory spinels from ultramafites: indicators of formation conditions. *Rudy i metally*, 2013, no. 6, pp. 30–34. In Rus.
4. Makeev A.V., Bryanchaninova N.I. *Topomineralogiya ultrabazitov Polyarnogo Urala* [Topomineralogy of ultrabasites of the Polar Urals]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1999. 252 p.
5. Yurichev A.N. Kalninsky ultramafic massif of Western Sayan: ore mineralization and its genetic nature. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 2, pp. 61–69. In Rus.
6. Yurichev A.N. Criteria of regional and local prediction of potential chromite-bearing of podiform ultramafic massifs of folded regions. *Rudy i metally*, 2016, no. 3, pp. 5–14. In Rus.
7. Perevozchikov B.V., Plotnikov A.V., Makiev T.T. Nature of variations in the composition of the ore and accessory chromespinels from Syum-Kaew ultrabasic massif (Polar Urals). *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*, 2007, no. 4, pp. 32–39. In Rus.
8. Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Kulkov A.S. Ore mineralization of the Agardag ultramafic massif (Republic of Tyva). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 130–136. In Rus.
9. Aswad K.J.A., Aziz N.R.H., Koyi H.A. Cr-spinel compositions in serpentinites and their implications for the petrotectonik history of the Zagros Suture Zone, Kurdistan Region, Iraq. *Geological magazine*, 2011, vol. 148, pp. 802–818.
10. Tolkanov O.A., Chernobrovin V.P., Osloповskikh V.N., Rechkalova A.V., Pashkeev I.Yu. On phenomena of metamorphism of chromosphenelide of chromium ores on example of the Urals. Upper-Ufaleisky group of deposits and Kachkinsky deposit. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya*, 2005, no. 3, pp. 3–12. In Rus.
11. Turkin A.I., Sobolev N.V. Pyrope-knorringite garnets: overview of experimental data and natural paragenesis. *Russian Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 12, pp. 1169–1182.
12. Brey G.P., Doroshev A.M., Giris A.V., Turkin A.I. Garnet-spinel-olivine-orthopyroxene equilibria in the FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-Cr₂O₃ system: I. Composition and molar volumes of minerals. *Eur. J. Mineral.*, 1999, vol. 11, no. 4, pp. 599–617.
13. Sustavov S.G., Vakhrusheva N.V. Chromite rutile in chromitites of Yengaysky area of Ray-Iz massif. *Vestnik Ural'skogo otdeleniya Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva*, 2010, no. 7, pp. 159–162. In Rus.
14. Yang J., Bai W., Fang Q., Meng F., Chen S., Zhang Zh., Rong H. Discovery of diamond and an unusual mineral group from the podiform chromite ore Polar Ural. *Geology in China*, 2007, vol. 34, pp. 950–953.
15. *Stroenie, evolyutsiya i minerageniya giperbazitovogo massiva Ray-Iz* [Structure, evolution and mineralogy of Ray-Iz hyperbasite massif]. Eds. V.N. Puchkov, D.S. Shteynberg. Sverdlovsk, UrO AN SSSR Publ., 1990. 227 p.
16. Vakhrusheva N.V. *Metamorfizm khromitunosnykh giperbazitov Polyarnogo Urala*. Dis. Kand. nauk [Metamorphism of chromite-bearing hyperbasites of the Polar Urals. Cand. Diss.]. Ekaterinburg, 1996. 204 p.
17. Reed S.J.B. *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*. N.Y., Cambridge University Press, 2005. 189 p.

18. Shmelev V.R. Mantle ultrabasites of ophiolite complexes in the Polar Urals: petrogenesis and geodynamic environments. *Petrology*, 2011, vol. 19, no. 6, pp. 618–640.
19. Chernyshov A.I., Yurichev A.N. The Structural Evolution of Dunite and Chromite Ore from the Kharcheruz Massif, the Polar Urals. *Geotectonics*, 2016, vol. 50, no. 2, pp. 196–208.
20. Savelyeva G.N., Suslov P.V. Structure and composition of mantle peridotites at the boundary with crustal complexes of ophiolites in the Syumkeu massif, Polar Urals. *Geotectonics*, 2014, vol. 48, no. 5, pp. 347–358.
21. Karato S-I. *The Dynamic structure of the deep Earth*. Princeton, Princeton University Press, 2003. 256 p.
22. Karato Sh.-I. *Deformation of Earth Materials: an Introduction to the Rheology of Solid Earth*. Cambridge, Cambridge University Press, 2008. 463 p.
23. Christiansen F.G. Deformation of chromite: S.E.M. Investigations. *Tectonophysics*, 1986, vol. 121, no. 2–4, pp. 175–196.
24. Christiansen F.G. Deformation fabric and microstructures in ophiolitic chromitites and host ultramafics, Sultanate of Oman. *Geol. Rundsch.*, 1985, vol. 74, no. 1, pp. 61–76.
25. Biswajit G., Jyotiskanar R., Tomoaki M. Grain-scale plastic deformation of chromite from podiform chromitite of the Naga-Manipur ophiolite belt, India: Implication to mantle dynamics. *Ore Geology Reviews*, 2014, vol. 56, pp. 199–208.
26. Ghosh B., Konar R. Textural developments in chromite deforming under eclogite-facies conditions from the Neoproterozoic Sittampundi anorthosite complex, Southern India. *Geological Journal*, 2012, vol. 47, pp. 253–262.
27. Yarosh P.Ya., Buslaev F.P. *Struktury rud i istoriya formirovaniya rudnykh agregatov Uzelginskogo mestorozhdeniya* [Structure of ores and history of formation of ore aggregates of Uzelga deposit]. Sverdlovsk, UNTS AN SSSR Publ., 1985. 99 p.
28. Tyulyupo B.M. *Rudnye mestorozhdeniya. Chernye metally* [Ore deposits. Black metals]. Tomsk, Tomsk University Press, 1976. 176 p.

Received: 08 June 2017.

Information about the authors

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

УДК 504.75.05

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЗОЛЬНОГО ОСТАТКА ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА г. НОРИЛЬСКА КАК ВОЗМОЖНЫЙ ИНДИКАТОР ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА СРЕДЫ ОБИТАНИЯ

Рихванов Леонид Петрович¹,
rikhvanov@tpu.ru

Дериглазова Мария Александровна¹,
belyakinama@gmail.com

Барановская Наталья Владимировна¹,
natalya.baranovs@mail.ru

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

Актуальность работы обусловлена необходимостью получения информации о воздействии природных и антропогенных факторов на организм человека (его элементный и минеральный состав) в условиях городов с развитой промышленностью.

Цель работы: выявление региональных геохимических и минералогических особенностей зольного остатка организма человека г. Норильска в сравнении с ранее изученными городами, установление зависимости между составом окружающей среды города и составом организма человека – его жителя.

Методы исследования. Отбор проб зольного остатка организма человека проводился в крематории г. Норильска из невостробанного материала по официальному согласованию с администрацией; определение элементного состава материала выполнялось методами инструментального нейтронно-активационного анализа и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой; изучение минерального состава проводилось методами рентгеновской дифрактометрии и сканирующей электронной микроскопии; статистическая обработка данных осуществлялась методами корреляционного и кластерного анализа; построение диаграмм и сравнительный анализ данных выполнялись с помощью программ Statistica и Excel.

Результаты. Выявлены региональные геохимические и минералогические особенности изучаемого материала. Установлено, что зольный остаток организма человека г. Норильска концентрирует в большем количестве по сравнению с ранее изученными городами такие элементы, как: Mg, Al, P, Ca, Sc, Ni, Rb, Sr, Y, Zr, Cd, Cs, U и редкоземельные элементы. В составе зольного остатка организма человека обнаружены уникальные минеральные фазы меди, платины, никеля, цинка, золота, циркония, редкоземельных и радиоактивных элементов и другие, свидетельствующие о том, что медно-никелевый профиль производств находит свое отражение в минеральном составе зольного остатка организма человека г. Норильска. На основании данных элементного анализа, обнаруженных микрофаз, результатов кластерного, корреляционного и сравнительного анализов выдвинута гипотеза о возможном источнике поступления радиоактивных, редкоземельных элементов, гафния и циркония в зольный остаток организма человека г. Норильска.

Ключевые слова:

Зольный остаток, человек, г. Норильск, минеральный состав, элементный состав, гидроксилпатит, микроминеральные фазы, платина, золото, никель, медь, региональные особенности, циркон, монацит, элементный состав среды обитания.

Введение

Коллективом кафедры геоэкологии и геохимии Томского политехнического университета в течение нескольких лет проводится изучение зольного остатка организма человека (ЗООЧ) городов России, в которых имеются крематории [1–3]. Проведенные исследования позволяют взглянуть на проблему воздействия окружающей среды на организм человека под новым углом. В свете развития идей экологии, геохимии и медицинской геологии полученные результаты являются особенно актуальными и информативными.

Ранее проведенные исследования охватывали 5 российских городов (Новокузнецк, Новосибирск, Екатеринбург, Ростов-на-Дону, Санкт-Петербург). Для каждого из них определен элементный и минеральный состав зольного остатка организма человека, а также выделены региональные геохимические особенности ЗООЧ [1, 2]. Данные особенности напрямую связаны с ландшафтно-геохимической спецификой изучаемой территории

и факторами техногенеза от действующих предприятий. Однако очень часто сложно установить конкретный источник поступления некоторых элементов в организм человека в связи воздействием множества факторов в крупных городах. Для дальнейших исследований был выбран г. Норильск, в котором развит единый профиль предприятий по добыче и переработке медно-никелевых руд.

Выбор города Норильск для проведения исследований зольного остатка организма человека неслучаен и обоснован рядом факторов. Во-первых, промышленность Норильска представлена не комплексом предприятий, как во всех ранее исследованных городах, а монопроизводством, определяющим особенности техногенеза окружающей среды. Эта территория представляет собой изолированную природно-техногенную систему, так как промышленное предприятие г. Норильска использует в качестве ресурсов руду, уголь и другие ресурсы, добытые в окрестностях города. Во-вторых,

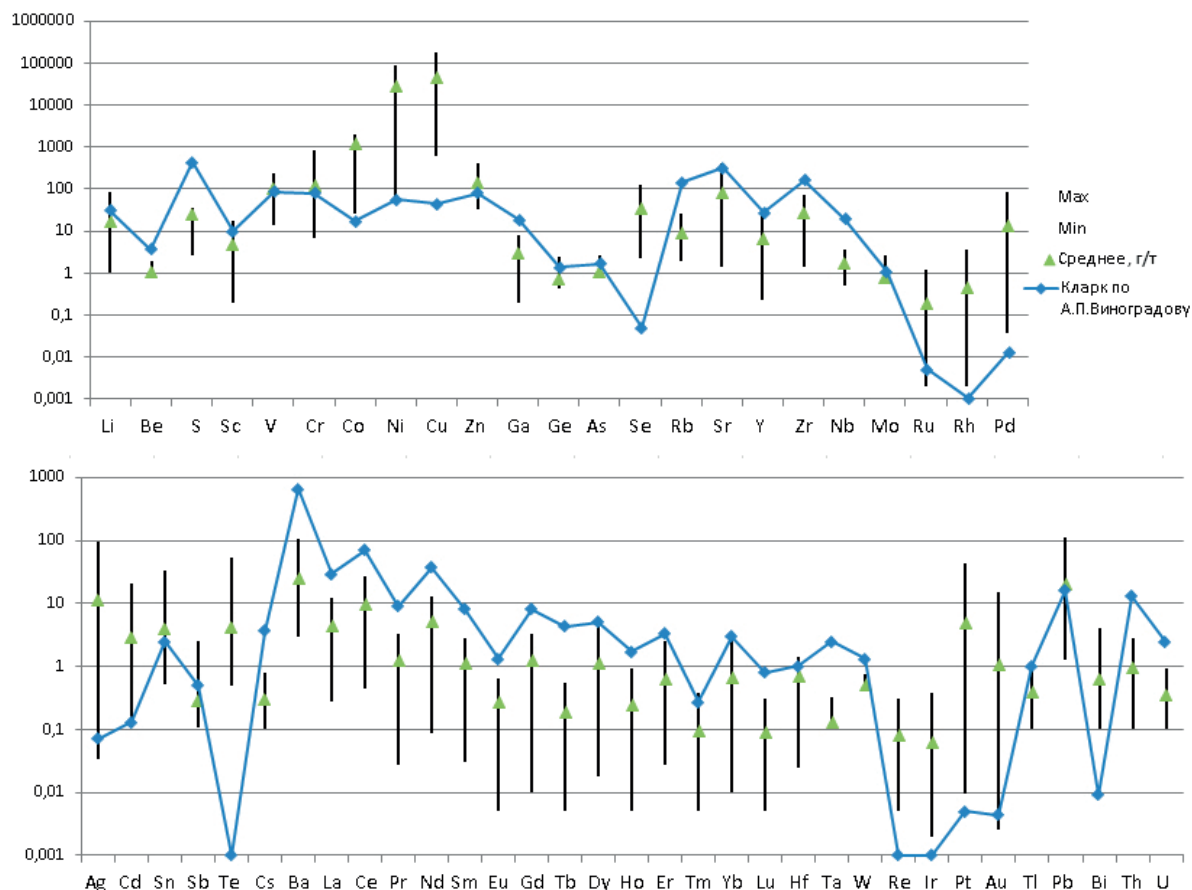


Рис. 1. Геохимическая специализация рудовмещающих пород Норильского района [5] относительно среднего содержания элементов в земной коре, г/т

Fig. 1. Geochemical specifics of the ore-bearing rocks of Norilsk region [5] relatively average content of the elements in the Earth's crust, g/t

по обобщенным данным исследователей, Норильск является, на данный момент, одним из самых загрязненных городов на территории России, а также входит в десятку наиболее грязных городов мира в 2007 и 2013 гг. наряду с Дзержинском по версии Института Blacksmith (США) и Green Cross (Швейцария) [4]. Кроме того, Норильский регион уникален с точки зрения геологического строения: Талнахское и Октябрьское месторождения медно-никелевых руд с высоким содержанием полезных компонентов относятся к богатейшим в мировом масштабе. В промышленных концентрациях в рудах присутствуют: медь, никель, кобальт, платина, палладий, родий, золото, серебро, селен, теллур, иридий, осмий, рутений, сера, железо, титан. Из шестнадцати названных элементов в настоящее время извлекается четырнадцать. Талнахское и Октябрьское месторождения содержат более половины активных запасов никеля, меди, кобальта и металлов платиновой группы России, а их разработка обеспечивает потребность страны в этом сырье. Геохимическая специфика рудовмещающих пород района, относительно среднего содержания для земной коры, достаточно хорошо просматривается (рис. 1).

Эколого-геохимическая характеристика района отбора материала для исследований

Эколого-геохимическое состояние окружающей среды Норильск-Талнахского региона определяется деятельностью заполярного филиала ОАО «ГМК Норильский Никель». Масса выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в 2015 г. составила 1883,24 тыс. т. (с тенденцией к незначительному снижению количества выбросов в период с 2010 по 2015 гг.), что в 4–7 раз превышает выбросы других крупных металлургических центров страны – Череповца, Новокузнецка, Магнитогорска и др. Среди основных загрязняющих веществ – диоксид серы, оксиды углерода и азота, серная кислота, а также аэрозоли тяжелых металлов [6].

Исследования снеговых вод и аэрозолей показали возможность воздушного переноса тяжелых металлов и загрязняющих веществ на расстояние до 30 и более км, с превышением ПДК для большинства проб по меди и никелю. На растительность оказывает активное воздействие металлическая пыль, оседающая на деревья, кустарники и мхи. Из тяжелых металлов в большей степени накапливаются медь, никель, кобальт, в меньшей – цинк, хром, свинец, кадмий, а также селен

и мышьяк. Мхи, произрастающие возле промплощадок, накапливают в сотни раз больше меди (700–1400 мг/кг) и никеля (250–500 мг/кг), а также свинца (30 мг/кг), цинка (35–45 мг/кг), кадмия (3–5 мг/кг) и других элементов [7].

Исследование пыли, отобранной в плавильных печах и других источниках на предприятии, показывает, что в составе выбросов преобладают такие компоненты, как Cu, Ni, Co, S, Fe, Al₂O₃, SiO₂, CaO, MgO. Всего в год, по подсчетам исследователей, в виде пыли выбрасывается 117 т никеля, 276 т меди, 4,24 т кобальта, 299 т железа, 180 т оксида кремния, 20,62 т оксида алюминия, 10,9 т оксида кальция, 9,8 т оксида магния [8]. При этом исследование содержания редкоземельных и радиоактивных элементов не проводилось. Химический состав пыли плавильного цеха Надеждинского завода представлен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав пыли плавильного цеха [8]

Table 1. Chemical composition of the smelter dust [8]

Материал Material	Химический состав, мас. % Chemical composition, wt. %					
	Ni	Cu	Co	Fe	S	SiO ₂
Пыль плавильного цеха Smelter dust	1,5	2,0	0,1	25,5	3,2	23,8
	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	Zn	Pb	Sn
	3,1	7,2	4,3	0,1	0,02	0,027

В структуре общей заболеваемости г. Норильска первое место на протяжении 5 последних лет занимают болезни органов дыхания, доля которых составляет 22,4 %. Второе место – болезни глаз и их придатков – 11,8 %. Третье место – болезни костно-мышечной системы – 11,1 %. На четвертое место вышли болезни системы кровообращения – 10,5 %. На пятом месте – болезни мочеполовой системы – 8,5 %.

Показатель общей смертности в Норильске ниже, чем в Красноярском крае, а также в целом по стране. В структуре общей смертности в течение последних лет на I месте остается смертность от болезней системы кровообращения, в 2010 г. она составила 172,9 на 100 тыс. населения. На втором месте несчастные случаи, травмы и отравления, связанные в основном с профессиональной деятельностью, – 142,8 на 100 тыс. населения. На третьем месте новообразования – 87,7 на 100 тыс. населения, за счет случаев смерти от злокачественных новообразований. На четвертом месте болезни системы пищеварения – 61,1. На пятом месте смертность от болезней органов дыхания – 59,6. При этом риск возникновения канцерогенеза для населения муниципального образования города Норильск, по данным о среднегодовых концентрациях канцерогенных веществ в атмосферном воздухе, самый высокий в мире, а показатель индивидуального канцерогенного риска, связанный с загрязнением воздуха оксидами кобальта и никеля, выходит за пределы приемлемого риска для населенных мест [9, 10].

Таким образом, антропогенное загрязнение атмосферного воздуха свинцом, никелем, кобальтом и другими веществами приводит к высокому уровню канцерогенного и неканцерогенного риска для населения г. Норильска. При этом мишенями воздействия атмосферных загрязнителей в первую очередь становятся органы дыхания, кровь, центральная нервная система, страдает общее развитие, происходит локальное повреждение органов и систем организма человека.

Исходя из этого, можно предположить, что за счет ингаляционного и прерорального поступления данных веществ в организм человека, жителя города Норильск, происходит концентрирование вышеуказанных элементов, и это должно отразиться на составе ЗООЧ.

Материалы и методы исследования зольного остатка организма человека

Материалом для проведения исследования является зольный остаток организма человека – крематорный материал, оставшийся после сжигания тела человека. Исследования подобного рода не новы и были широко распространены в середине 20 века, когда зола человеческого тела использовалась для определения содержания радиоактивных изотопов (Ra²²⁶ и других) в организме [11–14]. Очевидным преимуществом такого материала по сравнению с отдельными органами и тканями является возможность оценки общего содержания элементов и радионуклидов в человеческом теле.

Пробы ЗООЧ были отобраны из неостребованного материала в июле 2015 г. в крематории г. Норильска в установленном порядке по официальному разрешению администрации учреждения. Полученные результаты по элементному составу ЗООЧ г. Норильска сравнивались с результатами проб, отобранных ранее в крематориях 5 городов России: Новосибирска, Новокузнецка, Ростова-на-Дону, Санкт-Петербурга и Екатеринбурга [1–3]. Режимы работы крематориев одинаковы для всех городов и обусловлены едиными требованиями к работе, в первую очередь, к температурному режиму, который составляет 872 °С в начале процесса и 1092 °С в конце. Такая температура сгорания обусловлена требованиями к качеству праха: при менее 1000 °С костная ткань организма обугливается, а при большей температуре происходит остеклование костей – образование твердой корки фосфорно-кислой извести, которая препятствует сгоранию.

Всего в крематории г. Норильска было отобрано 22 пробы ЗООЧ. Соотношение мужчин и женщин в выборке составило 13:9 соответственно. Никаких других данных по возрасту, заболеваемости, а также причинам смерти не было известно.

При изучении зольного остатка организма человека были использованы различные методы исследования вещественного состава. Для определения минералогического состава применялся метод рент-

геноструктурного фазового анализа с использованием порошкового дифрактометра D2 PHASER фирмы Bruker. Исследовались как отдельные, так и групповые смешанные пробы. Смешанные пробы были приготовлены путем квартования отдельных проб и дальнейшего смешивания четвертых частей всех проб. Для анализа материал был предварительно истерт в агатовой ступке до однородной пылеобразной массы. Истолченный образец помещался в кювету и анализировался в течение 4 часов для получения статистически достоверного результата. Обработка результатов проводилась с помощью специализированной программы «Eva». Данный метод позволяет обнаруживать присутствие минеральной фазы в исследуемой смеси на уровне 0,1 и более %.

Для изучения морфологии выявленных минеральных фаз, а также установления их элементного состава использовался сканирующий электронный микроскоп Hitachi S-3400N с энергодисперсионной приставкой для микроанализа фирмы Bruker. Минимальное разрешение при глубоком вакууме составляет 3 нм, при этом микроскоп позволяет получить увеличение до 300000 раз, но в нашем случае использовались такие условия, которые позволяли диагностировать объект размером в первые микрон.

Для работы на микроскопе пробы были предварительно подготовлены специальным образом. Исследуемый образец истирался в агатовой ступке до однородной массы, помещался на клейкую ленту и исследовался при низком или среднем вакууме. Часть проб была подвергнута дополнительному концентрированию с помощью воды. В стерильном контейнере с помощью дистиллированной воды материал был разделен на 3 фракции: легкую, среднюю, тяжелую. Все фракции были исследованы отдельно. С помощью электронного микроскопа были проанализированы 10 проб зольного остатка организма человека г. Норильска. Приставка для микроанализа позволяет снимать энергодисперсионные спектры присутствующих элементов и делать вывод о качественном (от Li до U) и количественном (в процентном соотношении) составе образца. Минимальный уровень детектирования составляет 0,1 %.

Определение элементного состава ЗООЧ осуществлялось двумя независимыми способами: методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на 62 химических элемента в лаборатории химико-аналитического центра «Плазма» и методом инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) на 28 элементов, выполненного в ядерно-геохимической лаборатории ТПУ. Все лаборатории, в которых выполнялись анализы, имеют аккредитацию в системе ГОСТ Р и работают по аттестованным методикам. В процессе исследования осуществлялся внутренний и внешний контроль. Полученные результаты позволили оценить качество аналитических данных как удовлетворительное. Следует отметить,

что особенностью выполнения анализа методом ICP-MS является требование полного разложения исследуемого вещества, вследствие чего могут возникнуть аналитические погрешности, в отличие от метода ИНАА, который не требует химического разложения и тем самым исключает возможность возникновения такого рода ошибки.

Результаты и их обсуждение

Основной объем проб представлен порошкообразной массой от светло-серого до темно-серого цвета с некоторыми включениями разнообразной формы. Преимущественно размер фракции исследуемого материала составляет меньше 0,01 мм, при этом размер отдельных зерен, наблюдаемых под электронным микроскопом, составляет в среднем десятки микрон.

Рентгеноструктурное исследование ЗООЧ показало, что основным минералом матрицы исследуемого материала является гидроксилapatит – $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ (гидроксилapatит-I), на долю которого приходится более 99,5 % объема исследованных проб. В отдельных пробах кроме данного минерала встречается гидроксилapatит с примесью кремнезема (гидроксилapatит-II) – $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{SiO}_4)(\text{OH})$, который составлял около 50 % от всего объема исследуемой пробы (рис. 2). Эта кремнийсодержащая разновидность гидроксилapatита обнаружена в основной массе ЗООЧ только данного города, что само по себе является интересным и требует дальнейшего изучения.

Исследование с помощью электронного микроскопа крупных минеральных агрегатов в ЗООЧ г. Норильска также показало, что на долю гидроксилapatита приходится до 99 % и более объема исследованных проб. Наряду с гидроксилapatитом стандартного состава в пробах зольного остатка жителей города Норильска было также отмечено присутствие агрегатов, в которых Na, K и Mg заменяют Ca на 70–90 % (рис. 3). Таким образом, электронно-микроскопическое изучение ЗООЧ г. Норильска позволяет четко выделять два типа гидроксилapatита различного состава (табл. 2). Показательным отличием данных разновидностей является соотношение Ca/P. Для стандартного гидроксилapatита оно составляет 2,6, что приблизительно к соотношению, определенному Ф. Бетсом и А. Кораго для гидроксилapatита сухой кости и эмали зубов [15–18], тогда как в замещенной разновидности данное отношение составляет 0,9. В качестве основных примесей в составе изученных агрегатов выступают Na, K, Mg (<10 % для первого типа, >10 % для второго типа), иногда S, Al, Si, Cl на уровне менее 1 %. Природа второго типа гидроксилapatита нам пока неизвестна. Более того, в исключительных случаях в пробах ЗООЧ г. Норильска наблюдаются безкальциевые фосфаты, в которых отмечено высокое содержание магния.

Визуальное распределение основных составляющих обеих разновидностей гидроксилapatита

Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)

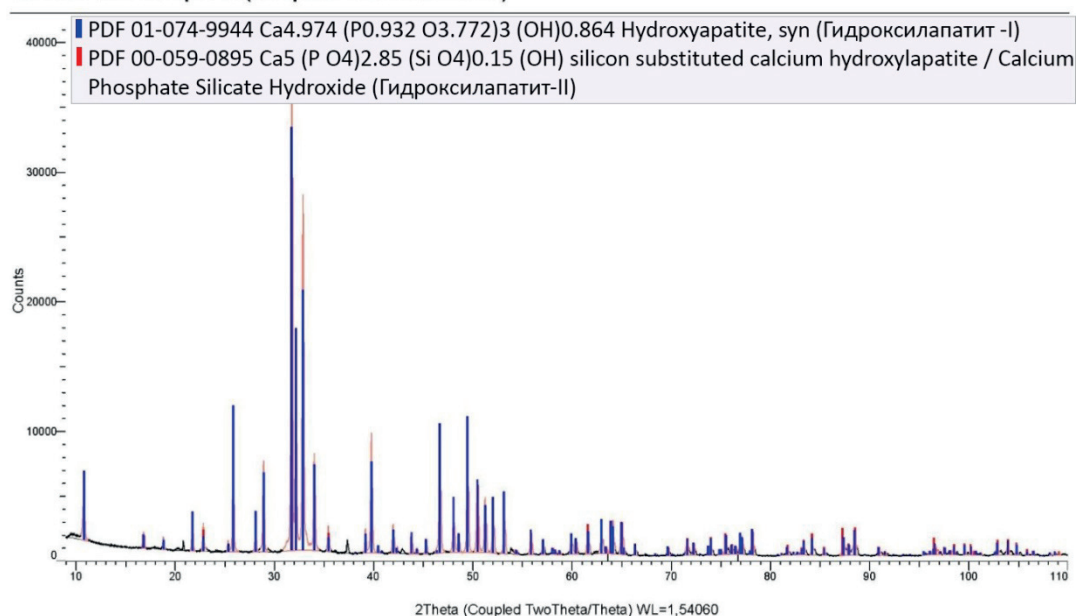


Рис. 2. Дифрактограмма ЗООЧ г. Норильска

Fig. 2. Diffractogram of the human body ash residue of Norilsk residents

Таблица 2. Элементный состав минеральной матрицы ЗООЧ г. Норильска в сравнении с составом кости и эмали зубов человека

Table 2. Element composition of the mineral matrix of the human body ash residue of Norilsk residents in comparison with the composition of the human bone and tooth enamel

Элемент Element	Гидроксилапатит ЗООЧ г. Норильска (среднее по 7 измерениям), % Hydroxyapatite of hydroxyapatite in the human body ash residue of Norilsk residents (average for 7 measurements), %		Безкальциевый фосфат Mg, Na и K в ЗООЧ г. Норильска (среднее по 3 измерениям), % Mg, Na and K phosphate without Ca in the human body ash residue of Norilsk residents (average for 3 measurements), %	Состав кости человека по данным Ф. Бетса, % [15] Composition of the human bone according to F. Betts, % [15]	Состав сухой эмали зу- бов человека по дан- ным А. Кораго, % [16] Composition of the dry human enamel according A. Korago, % [16]
	первый тип first type	второй тип second type			
Ca	36,9	14,7	1,2	24	33,6–39,4
O	42,0	40,0	42,0	–	–
P	14,0	17,0	18,0	11,2	16,1–18,0
Na	1,5	10,8	7,2	0,5	0,25–0,9
Mg	0,4	1,8	16,1	0,3	0,25–0,56
Cl	Иногда (sometimes) 0,1–0,3	Иногда (sometimes) 0,1–3,0	–	0,01	0,19–0,3
K	0,3	9,7	13,2	0,2	0,05–0,3
F	<0,1	<0,1	–	0,5	0,05–0,5

(Ca, P и O) равномерное и однородное (рис. 4, 5). Близко к однородному распределению K, Na и Mg, которое отмечается при вхождении в состав гидроксилапатита. Однако, наряду с таковым, также наблюдается и точечный характер распределения этих компонентов, что позволяет предполагать наличие собственных минеральных фаз данных элементов (рис. 6). Такая фаза была отмечена нами при исследовании одной из проб ЗООЧ г. Норильска (рис. 7). По составу данный минерал приближен к группе струвита и представляет собой фосфат магния, натрия и калия. При этом облик найденных кристаллов, а также их состав весьма похожи на хазенит – один из недавно открытых

редких минералов [19, 20]. Однако отсутствие технических средств для микродифрактометрии, а также специфические условия подготовки пробы для исследования не позволяют утверждать присутствие данного минерала в ЗООЧ г. Норильска и требуют более детального изучения.

Среди вышеуказанных элементов, имеющих равномерный характер распределения, что позволяет предполагать изоморфную форму их нахождения в кристаллической решетке, в гидроксилапатитовой матрице отмечается присутствие точечных скоплений элементов, которые соответствуют нахождению многочисленных микроминеральных фаз этих элементов микронных размеров. Данные

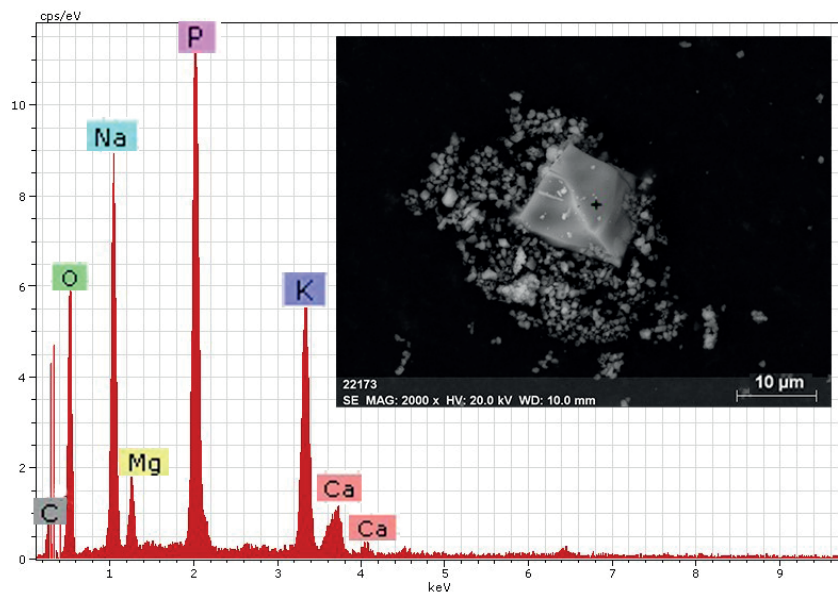


Рис. 3. Микроминеральная фаза гидроксилapatита второго типа со значительной примесью Na, K и Mg в зольном остатке организма человека г. Норильска и энергетический спектр в указанной точке

Fig. 3. Mineral phase of hydroxyapatite with a considerable impurity of Na, K and Mg in the human body ash residue of Norilsk residents and its energy spectrum

включения имеют разнообразный элементный состав, однако точная диагностика этих фаз на данный момент не может быть проведена по причине отсутствия оборудования для микродиагностики минералов. Следует отметить, что под термином «микроминеральные фазы» нами понимаются агрегаты определенного состава, диагностируемые с помощью электронного микроскопа. Изучение таких агрегатов в первую очередь направлено на подтверждение высоких концентраций некоторых элементов в исследуемом материале.

В составе матрицы на сегодняшний день установлены как минимум 23 самостоятельные минеральные фазы (табл. 3), в том числе микрофазы Cu, Ni и Pt, которые, несомненно, отражают специфику металлургических производств города.

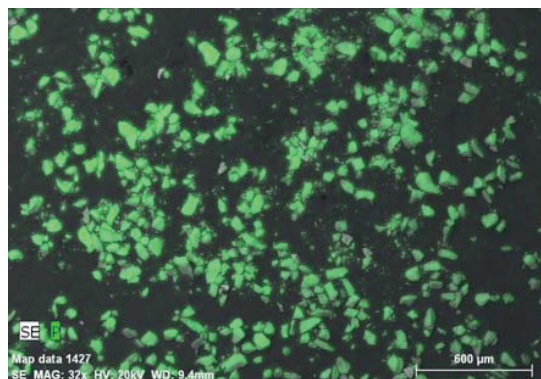


Рис. 5. Равномерное распределение P в ЗООЧ г. Норильска

Fig. 5. Homogenous P distribution in the human body ash residue of Norilsk residents

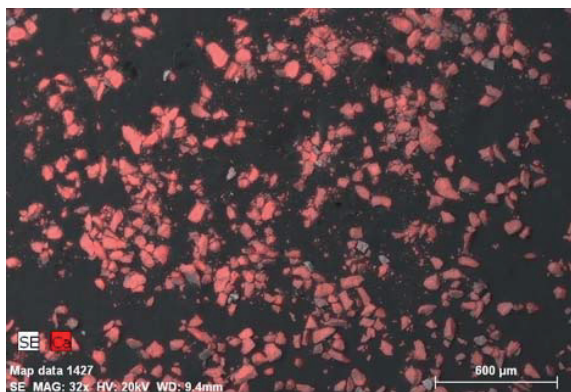


Рис. 4. Равномерное распределение Ca в ЗООЧ г. Норильска

Fig. 4. Homogenous Ca distribution in the human body ash residue of Norilsk residents

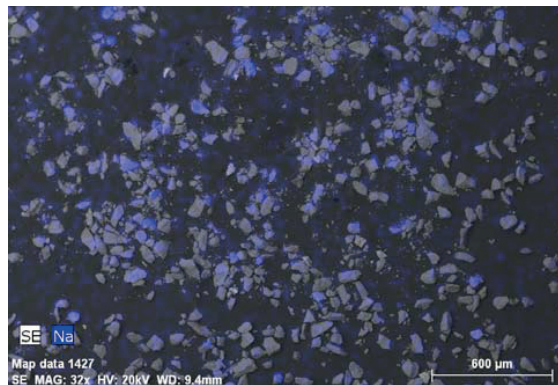


Рис. 6. Близкое к равномерному распределение Na в ЗООЧ г. Норильска

Fig. 6. Na distribution, close to homogenous, in the human body ash residue of Norilsk residents

Таблица 3. Микроминеральные фазы изученных элементов в ЗООЧ г. Норильска по данным электронной микроскопии
Table 3. Mineral phases of some elements in the human body ash residue of Norilsk residents according to the electron microscopy

Элемент Element	Средний размер агрегатов, состав минеральной фазы и её характеристика Average size of aggregates, Composition and characteristics of the mineral phase				
	Размер, мкм Size (μm)	Главные элементы, >10 % Main elements, >10 %	Сопутствующие элементы, 1–10 % Associated elements, 1–10 %	Примеси, <1 % Impurities, <1 %	Предполагаемая форма нахождения (*) Supposed occurrence form (*)
Al	~20×60	Al (49), O (41,1)	Si (2,1), S (1,1)	–	Корунд/Corundum
Si	~30×10	Si (48,3), O (34,1)	Al (8,9), (иногда (sometimes) Fe (4,4))	–	Кварц/Quartz
	~40×72	Si (17,5), O (39,3), Fe (14,7), Ti (11), иногда (sometimes) Zn (17,2) вместо (instead of) Fe	Mn (8,8), Al (2,7)	Pb	Алюмосиликаты Aluminosilicate
Ca	~30×30	Ca (52), O (46,6)	Cl (2), иногда (sometimes) Ti (5,6), Si (5,3), Al (1,5)	Fe	Карбонат кальция Calcium carbonate
	~200×50	Ca (38,8), O (21,5), Si (28,8)	Al (3,5), Fe (1,9), P (1,1)	–	Волластонит Wollastonite
Fe	~2×3	Fe (33,8–62), O (38,1)	иногда (sometimes) Mn (3,3), Ni (7,2)	S	Оксид железа Iron oxide
	~20×20	Fe (82,1)	O (5,7), Mn (1,2)	Al, Si	Самородное железо/Native iron
Cu (рис. 8) (Fig. 8)	~1×1	Cu (85,4), O (12,9)	–	–	Самородная медь или оксид меди Native copper or copper oxide
Cu	~6×3	Cu (75,2), S (18,6)	O (3,3)	Al, Si	Сульфид меди Copper sulphide
	~4×2	Cu (83,2)	O (3,5), Sn (3), Ni (2,7), Fe (1,8)	–	Интерметаллическое соединение Intermetallic compound
	~1,5×1,5	Cu (26,7), O (19,1), Sn (25,8)	Cl (2,5), Al (1,5)	Si, S	Бронза/Bronze
Zn (рис. 9) (Fig. 9)	~1×1	Zn (72,1), O (16,9)	–	Cu, Al, S	Оксид цинка/Zinc oxide
Sr	~12×7	Sr (34,2), O (29,6), Zn (15,1), Si (12,2)	Ti (3,2), Al (1,1)	–	–
Zr (рис. 10) (Fig. 10)	~40×20×15	Zr (41,9), O (44,2), Si (10,8)	Al (2,3), иногда (sometimes) Hf (1)	–	Циркон/Zircon
Ag	~1×1	Ag (34), O (29,1), Si (10,3)	Al (3,9)	Fe, Cu, S	–
Sn	~6×4	Sn (61,7), O (31,6)	Al (2,6), Fe (1,8)	Cu, Si	Касситерит/Cassiterite
Sb	~1×1	Sb (25,1), O (16,1), Ni (17,7), Cu (17,5)	Zn (4,9), Si (7,2), Ti (3,2), Al (2)	S	Омсит/Omsite
Ba	~2×3	Ba (25,4), O (31,7), Zn (10,5)	S (5,8), иногда (sometimes): Fe (9,25), Cu (2,5), Ti (8,6), Pb (5,8)	Si, Al, Cr	–
	~1×1	Ba (45,9), O (35,6), S (10,2)	–	–	Барит/Barite
Ce	~2×2	O (30,4), Ce (24,4), P (13,5), La (12)	Nd (9,9), Th (2,6)	–	Монацит/Monazite
Pt (рис. 11) (Fig. 11)	~1×1	Pt (44,8), O (27,4)	Cu (1,7)	Ti, Si, Fe	Самородная платина Native platinum
Au	~1,25×2,5	Au (33,2), O (15,9), Cu (18,8)	Ag (2,8)	Al, Si, Fe	Интерметаллическое соединение Intermetallic compound
Pb	~1×1	Pb (38,5), O (31,4)	Cl (6,1), иногда (sometimes) Ca (5,3)	Al, P	–

Примечание: Такие элементы как Ca, P, Na, K, Mg, S, Cl, Al и Si входят в состав матрицы ЗООЧ. При исследовании микрофаз эти элементы в результате рассеяния электронов обнаруживают свое присутствие в виде шума, искажающего реальный состав исследуемого агрегата. Знаком «*» обозначены предполагаемые формы нахождения данного элемента по элементному составу, полученному с помощью электронного микроскопа.

Note: Such elements as Ca, P, Na, K, Mg, S, Cl, Al and Si are part of the matrix of the human body ash residue. These elements can produce noise because of electron scattering that distorted the actual composition of the aggregate. The sign «*» shows the supposed element department by elemental composition obtained by an electron microscope.



Рис. 7. Неравномерное распределение Mg, в виде собственной минеральной фазы в ЗООЧ г. Норильска

Fig. 7. Irregular Mg distribution forming its own mineral phase in the human body ash residue of Norilsk residents

Изображение некоторых минеральных фаз представлено на рис. 8–11.

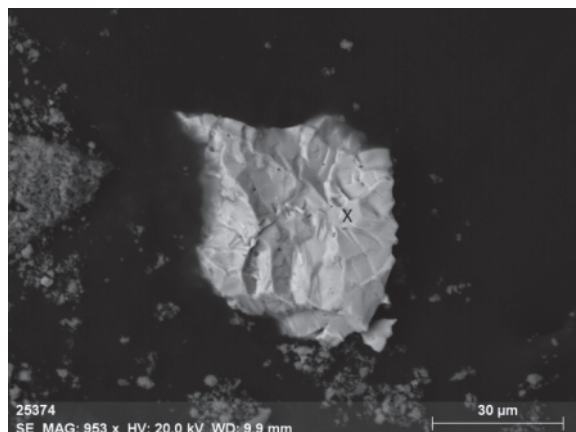


Рис. 8. Микроминеральная фаза меди в ЗООЧ г. Норильска

Fig. 8. Copper-bearing mineral phase in the human body ash residue of Norilsk residents

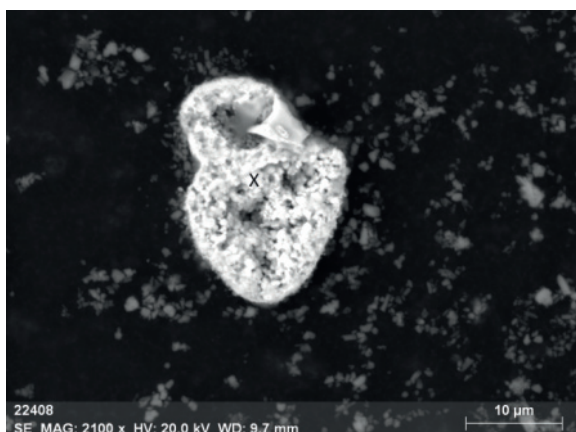


Рис. 9. Микроминеральная фаза цинка в ЗООЧ г. Норильска

Fig. 9. Zinc-bearing mineral phase in the human body ash residue of Norilsk residents

Минеральные фазы монацита, золота и циркона обнаружены одновременно в одной пробе ЗООЧ

г. Норильска, платины – в другой, но обе принадлежали мужчинам. Не исключено, что данные минеральные фазы характерны для организма рабочего промышленного предприятия г. Норильска, тем более что, по данным исследователей, концентрация платины в моче рабочих промышленных предприятий, имеющих дело с её производством и использованием, в тысячи раз превышает концентрацию данного металла у людей, не подвергавшихся воздействию [21]. Учитывая чрезвычайно низкую концентрацию платины в организме человека вообще [22, 23], нахождение такой частицы (рис. 11) указывает на специфику изучаемой территории и наличие в перерабатываемых рудах минерала платины – сперрилита ($PtAs_2$).

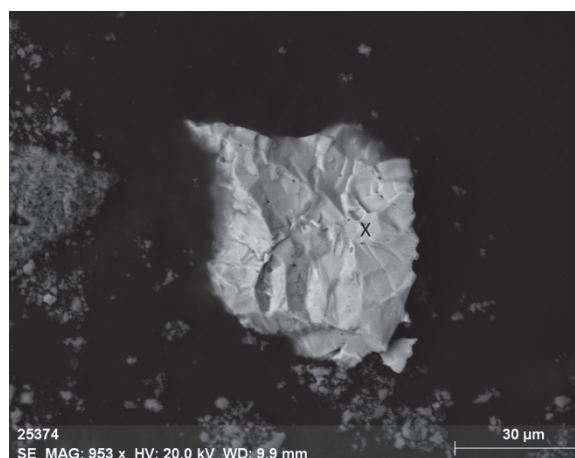


Рис. 10. Микроминеральная фаза циркона в ЗООЧ г. Норильска

Fig. 10. Zircon mineral phase in the human body ash residue of Norilsk residents

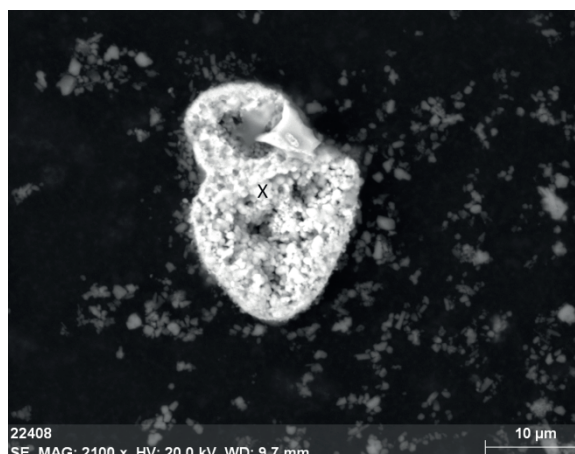


Рис. 11. Микроминеральная фаза платины в ЗООЧ г. Норильска

Fig. 11. Platinum-bearing mineral phase in the human body ash residue of Norilsk residents

Особое внимание обращает на себя наличие многочисленных микроминеральных фаз циркона, обнаруженных в пробе. Два агрегата данного минерала, найденные в ЗООЧ г. Норильска, отличались сохранением облика кристалла: дипирами-

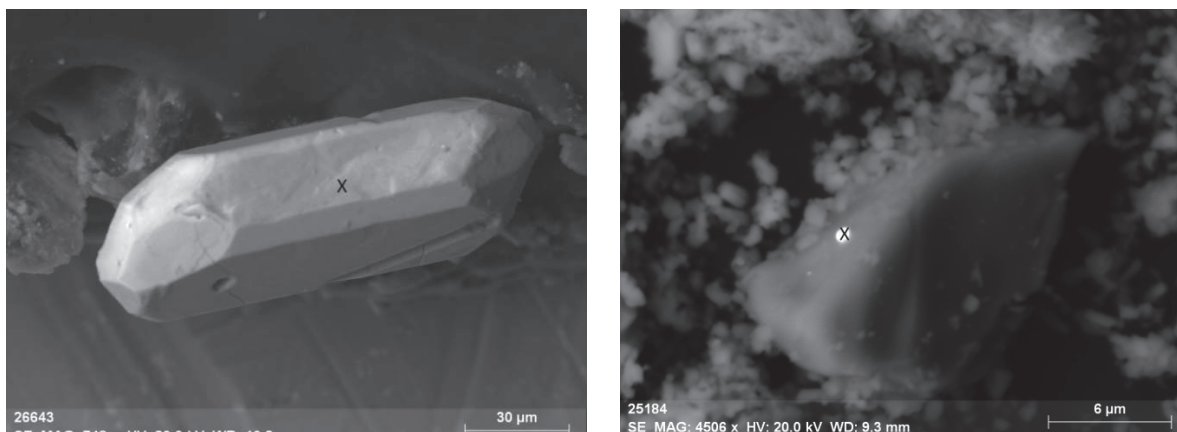


Рис. 12. Присутствие минеральных фаз в ЗООЧ различных городов. Условные обозначения: «●» – матричные элементы; «■» – часто встречающиеся, «▲» – встречающиеся; «x» – редко встречающиеся, специфичные элементы, установленные на данный момент в пробах только одного города

Fig. 12. Presence of mineral phases in the human body ash residue of different cities. The symbols: «●» – matrix elements; «■» – frequent elements, «▲» – elements which mineral phases have been found in the samples of two or more cities; «x» – rare, specific elements, which have been found in the samples of one city

дальнего с длиной ребра около 20 мкм для первого кристалла и дипирамидально-призматического с длиной кристалла около 120 мкм для второго (рис. 10). Облик данных кристаллов позволяет предполагать, что этот минерал образовался не в организме человека, а попал в него извне при дыхании ингаляционным путем.

Минералогическая специфика ЗООЧ г. Норильска значительно отличается от других городов не только наличием вышеуказанных минеральных фаз, но и относительным разнообразием их элементного состава. На рис. 12 указаны элементы, найденные в минеральных фазах ЗООЧ различных городов, которые показывают элементную и минеральную специфику г. Норильска по сравнению с ранее изученными городами.

Анализ приведенных данных показывает, что ЗООЧ г. Норильска отличается от других изученных нами городов наибольшим разнообразием минеральных фаз, с одной стороны, и большим количеством соединений, образуемых одним элементом, с другой. Так, например, медь встречается, в пробах г. Норильска как минимум в виде четырех соединений (самородная медь, оксиды, соединения с серой, интерметаллические соединения), тогда как в остальных городах установлено 1–2 вида соединений данного элемента. При этом в г. Норильске отмечается присутствие специфических минеральных фаз, характерных только для данной урбанизированной территории: платины, олова, сурьмы и других. Обращает на себя внимание частая встречаемость в ЗООЧ г. Норильска микроминеральных фаз редких (Zr, Hf), редкоземельных (La, Ce, Nd) и радиоактивных (Th) элементов. Характерной особенностью ЗООЧ г. Норильска является присутствие ярко выраженных кристаллов циркона. При этом облик и размер одного из них (рис. 10) весьма похож на кристалл циркона магматического типа [24]. Принимая

во внимание, что температура плавления циркона составляет 1800 °С, что много выше температуры сжигания материала, можно предположить, что это терригенная тонкодисперсная примесь, попавшая ингаляционным путем в организм человека и сохранившаяся в зольном остатке. Возможно, что такую же природу имеют микрофазы монацита. Причина нахождения этих столь тугоплавких минералов (циркона, монацита) в ЗООЧ г. Норильска требует своего объяснения и будет рассмотрена ниже при интерпретации геохимических особенностей зольного остатка организма человека г. Норильска. Но с высокой долей вероятности можно утверждать аэрогенную природу данных частиц и их поступление с пылью.

При интерпретации полученных данных стоит учитывать, что ЗООЧ не отражает реальный минеральный состав человеческого организма, так как является материалом, преобразованным под воздействием высоких температур. Это касается всех минералов, за возможным исключением гидроксилатапата, хотя, вероятно, и он претерпевает преобразование в процессе сгорания живого вещества. Это подтверждается данными многочисленных исследований [25–27], в которых уделяется большое внимание взаимодействию гидроксилатапата с органическим веществом в системе «минерал–раствор», определяющим итоговые свойства и состав минерала.

Вышеуказанная специфика выделяет город Норильск среди всех других городов с минералогической точки зрения, отражая воздействие промышленных выбросов на человека. С высокой долей вероятности можно предположить, что столь специфический минеральный состав ЗООЧ г. Норильска должен найти отражение в его химическом составе. Элементный состав исследованного материала, полученный с использованием методов ICP-MS и ИНАА, представлен на рис. 13. Диаграмма

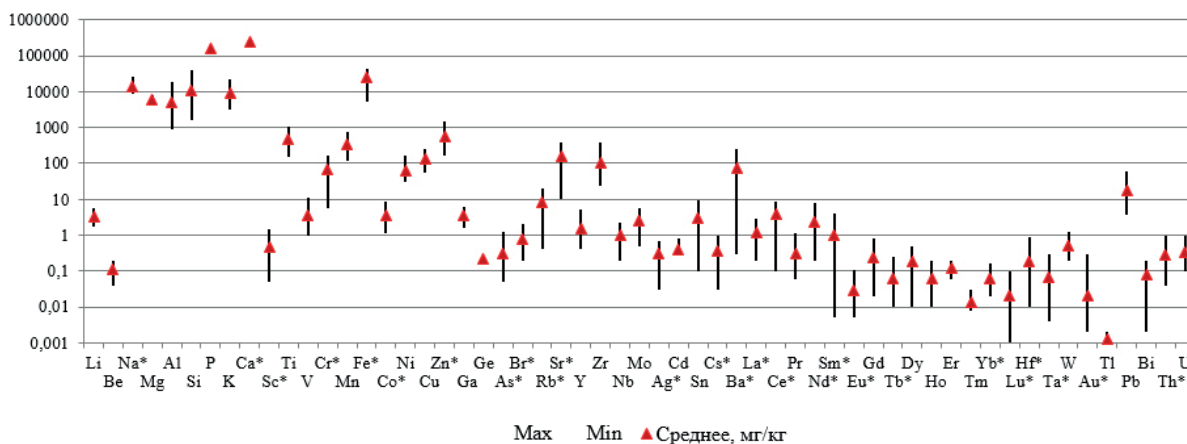


Рис. 13. Оценка уровней накопления химических элементов в зольном остатке организма человека г. Норильска, мг/кг. Знаком «*» обозначены элементы, концентрация которых определена с помощью метода ИНАА, концентрации остальных элементов определены с помощью метода ICP-MS. Для таких элементов, как As, Nd, Tb, Yb, Lu, Au и U, концентрация элемента определена ниже предела обнаружения в 50–90 % изученных проб

Fig. 13. Estimation of the levels of elements accumulation in the human body ash residue of Norilsk residents, mg/kg. The sign «*» indicates the elements, detected via instrumental neutron activation analysis, the other elements are detected via mass spectrometry with inductively coupled plasma. Concentrations of such elements as As, Nd, Tb, Yb, Lu, Au and U are detected below the detection limit

распределения элементов в зольном остатке организма человека г. Норильска подтверждает, что поведение элементов в ЗООЧ подчиняется основным законам геохимии: Оддо–Гаркина, Кларка–Вернадского и Д.И. Менделеева, что было отмечено и в ранее проведенных нами исследованиях [1–3].

Анализ диаграммы (рис. 13) позволяет выделить несколько групп элементов по уровням накопления в ЗООЧ г. Норильска:

- более 100000 мг/кг: Ca, P;
- от 1000 до 100000 мг/кг: Na, Mg, Al, K, Si, Fe;
- от 100 до 1000 мг/кг: Ti, Mn, Cu, Zn, Sr, Zr;
- от 10 до 100 мг/кг: Cr, Ni, Ba, Pb;
- от 1 до 10 мг/кг: Li, V, Co, Ga, Rb, Y, Mo, Sn, La, Ce, Nd, Sm;
- от 0,1 до 1 мг/кг: Be, Sc, Ge, As, Br, Nb, Ag, Cd, Cs, Pr, Gd, Dy, Er, Hf, W, Th, U;
- менее 0,1 мг/кг: Eu, Tb, Ho, Tm, Yb, Lu, Ta, Au, Tl, Bi.

Полученные группы в некоторой степени отражают общепринятую биологическую классификацию элементов, основанную на количественной оценке их содержания в организме человека, которая разделяет элементы на две группы: макроэлементы и микроэлементы. Очевидно, что основу зольного остатка организма человека г. Норильска составляют первые две группы элементов, из которых кальций, фосфор, натрий, магний и калий относятся по вышеуказанной классификации к макроэлементам, а железо и кремний – к микроэлементам. Следующие три группы также включают в себя такие микроэлементы, как медь, марганец, цинк, хром, никель, кобальт, молибден, и другие. В связи с этим обращает на себя внимание высокое накопление таких условно-токсичных элементов, как цирконий, свинец, лантан, церий,

и некоторых других наряду с вышеперечисленными микроэлементами.

Распределение практически всех элементов (за исключением кальция) подчиняется логнормальному закону, а кальция – нормальному, что указывает на значимость данного элемента для организма человека [28]. То же самое можно сказать про фосфор, натрий и магний, имеющие наименьшие коэффициенты вариации (<20 %) Вероятно, в организме человека имеется механизм, позволяющий поддерживать постоянную концентрацию данных элементов. Концентрация остальных элементов, возможно, зависит в большей степени от пищи, а также от различных факторов окружающей среды, поэтому их концентрация не так стабильна [28].

На основе имеющихся данных была проведена оценка уровней накопления элементов в ЗООЧ г. Норильска по половому признаку. Анализ полученных данных показывает, что многие элементы накапливаются в организме женщины и мужчины в близких количествах. Однако такие элементы, как Na, K, Zr, Rb, Y, Sn, Dy, Ho, Hf, имеют тенденцию к накоплению в мужском организме, что, вероятно, отражает специфику производственной деятельности человека. С другой стороны Cr, Fe, Co, Br, Mo, Ce, Eu, Ta, Pb, Bi накапливаются преимущественно в организме женщины в значимо больших количествах.

Результаты кластерного анализа (рис. 14) позволяют обнаружить несколько групп элементов, которые, по-видимому, имеют различный механизм поступления и накопления. Диаграмма в том числе показывает чрезвычайно тесную связь циркония и гафния. Однако стоит обратить внимание на то, что в случае кластерного анализа были учтены только результаты ICP-MS, так как, по на-

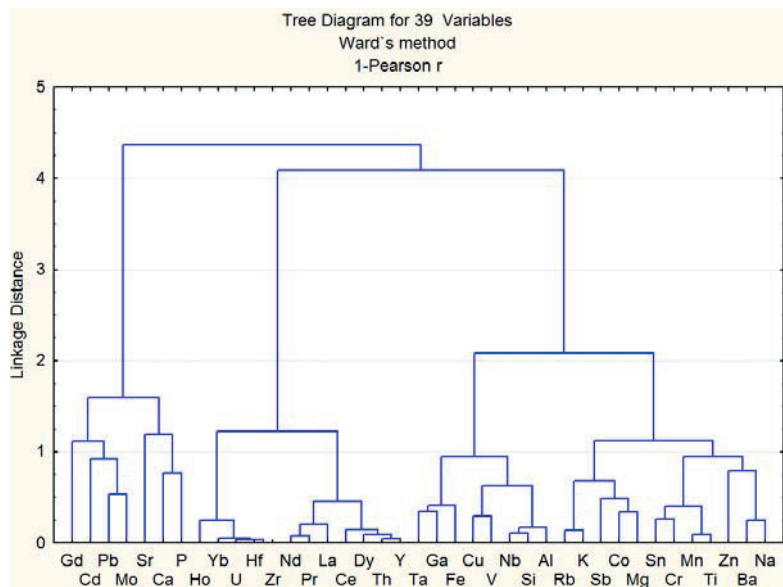


Рис. 14. Диаграмма кластерного анализа ЗООЧ г. Норильска по результатам ICP-MS

Fig. 14. Plot of cluster analysis of Norilsk residents' human body ash residue according to ICP-MS

шему мнению, они отражают характер накопления и взаимосвязей элементов в ЗООЧ г. Норильска наиболее полно и реалистично.

В качестве значимой связи нами была выбрана группа Са-Р как одна из сильнейших связей в человеческом организме, составляющая главный минерал костной ткани – гидроксилapatит. При этом чётко можно выделить следующие наиболее тесно связанные группы элементов: Ho, Yb, U, Hf, Zr (цирконовая); Nd, Pr, La, Ce, Dy, Th, Y (монацитовая); Ta, Ga, Fe; Sn, Cr, Mn, Ti; Cu, V, Nb, Si, Al; Rb, K, Sb, Co, Mg; Zn, Ba, Na; Pb, Mo, Cd (галенит-молибденитовая).

Первая группа удивительно напоминает ассоциацию элементов, характерную для минерала циркона, тогда как вторая – для монацита, что косвенно подтверждается и составом минеральных микрофаз в ЗООЧ. Остальные группы ассоциаций, по-видимому, отражают специфику пылевых поступлений от переработки основных типов руд, при этом последняя из них (Pb-Мо-Cd) возможно отражает присутствие в рудах компонентов наложенных рудных процессов (галенит-молибденитовая минерализация, встречающаяся в рудах Норильского типа).

Весьма показательно смотрятся результаты парного корреляционного анализа. Из анализа матрицы парных корреляций следует, что Са и Р, имеющие положительную, близкую к значимой связь между собой, с большинством других элементов имеют отрицательные связи, в том числе значимые отрицательные связи отмечены у кальция и фосфора с U, Th и некоторыми редкоземельными элементами. Сильные положительные связи между собой наблюдаются у группы элементов редких земель, радиоактивных элементов и циркония, что характерно для природных минералов редкометаллических руд (Zr^{+4} , Th^{+4} , U^{+4} и др.).

Для выявления элементов, концентрирующихся в ЗООЧ г. Норильска в большем количестве по сравнению с ранее изученными городами, была построена диаграмма коэффициентов концентрации, показывающая геохимическую специфику данного города (рис. 15).

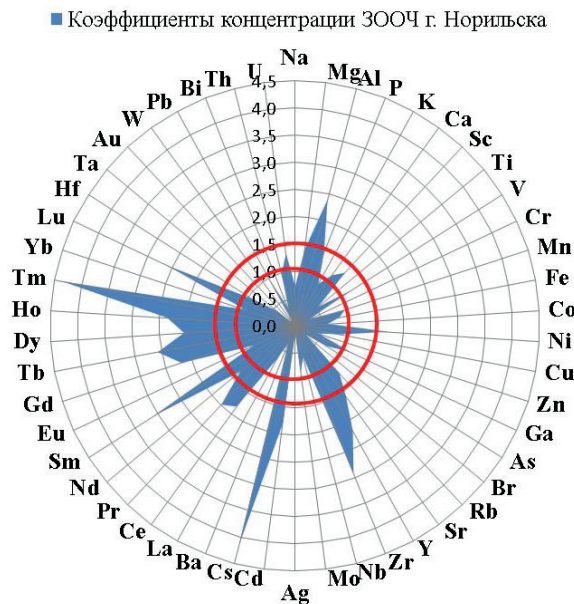


Рис. 15. Диаграмма коэффициентов концентрации элементов в ЗООЧ г. Норильска относительно среднего содержания в ЗООЧ всех изученных городов, по данным ИНАА и ICP-MS

Fig. 15. Chart of concentration coefficients of Norilsk residents' human body ash residue relatively average content of elements in previously studied cities according to the INAA and ICP-MS

На диаграмме отчетливо видно, что 300Ч г. Норильска концентрирует в большем количестве такие элементы, как: Mg, Al, P, Ca, Sc, Ni, Rb, Sr, Y, Zr, Cd, Cs, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Tm, Lu, U.

В соответствии с приведенными выше данными, 300Ч г. Норильска не выделяется на региональном уровне по содержанию меди, кобальта и золота, что может говорить о физиологических особенностях организма человека, способствующих эффективному выведению их из организма. Слабая выраженность медно-никелевой специфики. 300Ч г. Норильска косвенно соотносится с данными Э.В. Сокол, исследования которой показывают, что минеральные образования мочевыделительной системы (уролиты) людей, проживающих в городах, специализирующихся на добыче и переработке меди, никеля, свинца и цинка не выделяются на региональном фоне по содержанию данных элементов [29].

Такие элементы, как Mg, Ca, Al и Cd, являются составными компонентами пыли, образующейся на производстве (табл. 1), что могло стать причиной их накопления в организме жителя г. Норильска. Однако Fe, Zn, Co и Pb, содержащиеся в значительных количествах в пылевых выбросах, не находят своего отражения в геохимических особенностях зольного остатка организма человека г. Норильска, что может быть связано с размером выбрасываемых частиц, их морфологией, типом соединений и другими факторами [30].

Безусловный интерес вызывает повышенная концентрация Zr, Y, редкоземельных и радиоактивных элементов в 300Ч г. Норильска, источник которых не ясен. Данный спектр элементов не характерен для руд и рудовмещающих пород (рис. 1), хотя обращает на себя внимание некоторая обогащённость цирконием (до 60 г/т и более) вкрапленных руд в биотит-полевошпатовых и эпидот-хлорит-карбонатных метасоматитах. Можно высказать предположение, что одним из возможных источников поступления данных элементов в 300Ч могут быть циркон-ильменитовые пески, используемые в качестве флюсов в процессе производства. Косвенным подтверждением этого предположения может быть присутствие микроминералов циркона, с ярко выраженными кристалломорфологическими признаками их магматического происхождения (рис. 10), а также микрофаз, напоминающих по составу монацит. Однако данная гипотеза требует специального изучения. Кроме того, оксид циркония в ассоциации с торием и редкоземельными элементами широко используются в цветной металлургии в качестве материалов футеровки, повышающей жаростойкость и прочность конструкций, а также входит

в состав тиглей для плавления руды платины [31]. Таким образом, для установления источника поступления вышеуказанных элементов необходимо провести исследование материалов, использующихся в технологической цепочке производств комбината.

Заключение

Подводя итоги вышеизложенного, можно сделать следующие выводы:

1. В 300Ч г. Норильска установлено содержание 57 химических элементов, концентрирующихся в различных диапазонах содержаний. Распределение данных элементов подчиняется основным геохимическим законам и соотносится с общепринятыми представлениями о составе организма человека.
2. Минералогическая специфика 300Ч г. Норильска выражается в разнообразии найденных минеральных фаз и типов соединений элементов, а также в наличии специфических минеральных фаз Pt, Zr, Cu, Ni и других, которые, скорее всего, отражают воздействие промышленности на организм человека. Наличие разнообразных соединений меди, никеля, цинка, золота, серебра и платины свидетельствует о том, что медно-никелевая специфика данной территории находит свое отражение в минеральном составе 300Ч г. Норильска, формируя множественные минеральные фазы. При этом концентрация этих элементов в составе 300Ч минимальна.
3. Геохимическая специфика 300Ч г. Норильска выражается в повышенной концентрации следующих элементов: Na, Mg, Al, P, Ca, Sc, Ni, Sr, Y, Zr, Cd, Cs, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Tm, Lu, U.
4. Чрезвычайно высокие концентрации радиоактивных и редкоземельных элементов в зольном остатке организма человека г. Норильска по сравнению с другими городами, а также результаты кластерного, корреляционного и электронно-микроскопического анализов позволяют предположить возможный источник их поступления. По имеющимся данным таким источником может быть использование песков, содержащих циркон и ильменит, используемых как флюс, а также использование в производстве жаропрочных и ударостойких материалов и тиглей.
5. Результаты работы показывают, что изученные пробы зольного остатка организма некоторых людей из г. Норильска отражают состав среды обитания, обнаруживая, с одной стороны, выбросы промышленного предприятия, а с другой – состав используемых в производстве руд.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Региональные биогеохимические особенности накопления химических элементов в зольном остатке организма человека / Т.Н. Игнатова, Н.В. Барановская, Л.П. Рихванов, А.Ф. Судыко // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 1. – С. 178–183.
2. Mineralogical and geochemical characteristics of the human body ash residue / L.P. Rikhvanov, N.V. Baranovskaya, M.A. Deriglazova, A.B. Strelnikova // Procedia Chemistry. – 2014. – V. 10. – P. 454–459.
3. Mineralogical and geochemical features of human body ash residue of spatially-localized technogenic system (Norilsk city) / L.P. Rikhvanov, M.A. Deriglazova, N.V. Baranovskaya, I.A. Matveenko // IOP Conference series: Earth and Environmental science. – 2016. – № 43. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/43/1/012039/pdf/> (дата обращения: 17.01.2017)
4. Bernhardt A., Gysi N. The world's worst 2013: the top ten toxic threats. – Switzerland: Blacksmith Institute and Green Cross, 2013. – 36 p.
5. Опережающие геофизические исследования в пределах Хантайско-Рыбинского поднятия с целью оценки перспектив медно-никелевого оруденения / П.Г. Падерин, А.Н. Онищенко, Ф.Д. Лазарев, П.В. Кирплук и др. – СПб: ОФ ФГУП ВСЕГЕИ, 2014. – 866 с.
6. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2015 году». – М.: Минприроды России; НИИ-Природа, 2016. – 639 с.
7. Голубчиков С. Город, в котором дышат серой // Биология. – 2001. – № 4. URL: <http://bio.1september.ru/article.php?ID=200100408/> (дата обращения: 12.02.2016).
8. Велюжинец Г.А. Пылегазовые потоки и рациональные направления их оптимизации при переработке сульфидных медно-никелевых руд (на примере ЗФ ОАО «ГКМ Норильский Никель»): дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2015. – 230 с.
9. Куркатов С.В., Тихонова И.В., Иванова О.Ю. Оценка риска воздействия атмосферных загрязнителей на здоровье населения г. Норильска // Гигиена и санитария. – 2015. – № 2. – С. 28–31.
10. Заболеваемость злокачественными новообразованиями населения г. Норильска. Формирование групп повышенного риска / О.А. Ананина и др. // Сибирский онкологический журнал. – 2013. – № 4. – С. 58–61.
11. Krebs A. The radioactivity of the human being // Science. – 1954. – V. 120. – P. 429–431.
12. Hursh J.B., Gates A.A. Body radium content of individuals with no known occupational exposure // Nucleonics. – 1950. – V. 7. – P. 49–59.
13. Muth H., Rajewsky B., Hantke H.J. The normal radium content and the Ra-226/Ca ratio of various foods, drinking water and different organs and tissues of the human body // Health Physics. – 1960. – V. 2. – P. 239–245.
14. Шевченко Е.В., Коржув А.В., Москвина Н.А. Исследование долгоживущего изотопа радия Ra^{226} , отлагающегося в костях человеческого скелета: исторический аспект // Сибирский медицинский журнал. – 2012. – № 3. – С. 143–145.
15. Betts F., Blumenthal N.C., Posner A.S. Bone mineralization // Journal of Crystal Growth. – 1981. – V. 53. – P. 63–73.
16. Кораго А.А. Введение в биоминералогию. – СПб.: Недра, 1992. – 280 с.
17. Герк С.А., Голованова О.А. Элементный состав костной ткани человека в норме и при патологии // Вестник Омского университета. – 2015. – № 4. – С. 39–44.
18. Лемешева С.А. Химический состав, свойства костного апатита и его аналогов: дис. ... канд. хим. наук. – М., 2010. – 155 с.
19. Yang H., Sun H.J., Downs R.T. Hazenite $KNaMg_2(PO_4)_2 \cdot 14H_2O$, a new biologically related phosphate mineral, from Mono Lake, California, U.S.A. // American Mineralogist. – 2011. – V. 96. – P. 675–681.
20. Yang H., Sun H.J. Crystal structure of a new phosphate compound $Mg_2KNa(PO_4)_2 \cdot 14H_2O$ // Journal of Solid State Chemistry. – 2004. – V. 177. – P. 2991–2997.
21. Urinary excretion of platinum from platinum-industry workers / R. Schierl, H.G. Fries, C. van de Weyer, G. Fruhmann // Occupational and Environmental Medicine. – 1998. – № 2 (2). – P. 138–140.
22. Fourth National Report on human exposure to Environmental Chemicals. – Atlanta: Department of Health and Human Services, Center for disease control and prevention, 2009. – 520 p.
23. Fourth National Report on human exposure to Environmental Chemicals. Updated Tables – Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services, 2017. – 640 p.
24. Caricchi L., Simpson G., Schaltegger U. How much magma is hiding beneath our feet? // University of Geneva. – 2014. URL: http://www.unige.ch/sciences/Actualites/2014/News-230714-1_en.html (дата обращения: 15.03.2016).
25. Medical geochemistry. Geological materials and health / P. Censi, Th.H. Darrah, Y. Erel et al. – New York, London: Springer Dordrecht Heidelberg, 2013. – 194 p.
26. Sahai N. Medical Mineralogy and Geochemistry: an Interfacial Science // Elements. – 2007. – V. 3. – P. 381–384.
27. Boskey A. Mineralization of bones and teeth // Elements. – 2007. – V. 3. – P. 385–391.
28. Liebscher K., Smith H. Essential and non-essential trace elements // Archives of Environmental Health. – 1968. – № 2 (17). – P. 881–890.
29. Микроэлементный состав нефролитов как маркер воздействия окружающей среды на человека / Э.В. Сокол и др. // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. – 2007. – № 2. – С. 151–163.
30. Fibini B., Fenoglio I. Toxic potential of mineral dusts // Elements. – 2007. – V. 3. – P. 407–414.
31. Справочник по редким металлам / пер. с англ. под редакцией В.Е. Плющева. – М.: Мир, 1965. – 946 с.

Поступила 18.08.2017 г.

Информация об авторах

Рихванов Л.П., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Дериглазова М.А., аспирант кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Барановская Н.В., доктор биологических наук, профессор кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 504.75.05

MINERAL AND GEOCHEMICAL COMPOSITION OF HUMAN BODY ASH RESIDUE OF NORILSK RESIDENTS AS A POSSIBLE INDICATOR OF ELEMENTAL COMPOSITION OF THE ENVIRONMENT

Leonid P. Rikhvanov¹,
rikhvanov@tpu.ru

Maria A. Deriglazova¹,
belyakinama@gmail.com

Natalia V. Baranovskaya¹,
natalya.baranovs@mail.ru

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

The relevance of the current paper is caused by the need to obtain knowledge about the influence of natural and man-made factors on the human organism (elemental and mineral composition) in the process of urbanization.

The main aim of the study is to reveal regional geochemical and mineralogical features of human body ash residue of Norilsk residents in comparison with cities which have been studied earlier, as well as to establish relations between the composition of the habitat and the human organism.

The methods used in the study. Unclaimed material was sampling in the Norilsk crematorium with the official permission of administration; elemental composition was detected by instrumental neutron activation analysis and mass-spectrometry with inductively coupled plasma; mineral composition was studied by x-ray analysis and scanning electron microscopy; statistical data processing was implemented by methods of correlation and cluster analysis; diagramming and comparative analysis were realized via programs such as Statistica and Excel.

The results. Geochemical and mineralogical features of the studied material were revealed. It was found, that human body ash residue of Norilsk residents concentrates such elements as Mg, Al, P, Ca, Sc, Ni, Rb, Sr, Y, Zr, Cd, Cs, Ce, U and rare earth elements in greater quantities in comparison with previously studied cities. Specific mineral phases of Cu, Pt, Ni, Zn, Au, Zr, rare-earth and radioactive elements were discovered and it shows the copper-nickel specific of Norilsk in the mineral composition of human organism. Based on the results of the elemental and mineral composition, cluster and correlation analysis, the hypothesis about possible source of radioactive, rare-earth elements, Hf and Zr in the human body ash residue of Norilsk residents was offer.

Key words:

Ash residue, human, Norilsk, mineral composition, element composition, hydroxyapatite, micromineral phases, platinum, gold, nickel, copper, regional features, zircon, monazite, element composition of the environment.

REFERENCES

- Ignatova T.N., Baranovskaya N.V., Rikhvanov L.P., Sudyko A.F. Regional biogeochemical features of elements accumulation in human body ash residue. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 317, no. 1, pp. 178–183. In Rus.
- Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Deriglazova M.A., Strelnikova A.B. Mineralogical and geochemical characteristics of the human body ash residue. *Procedia Chemistry*, 2014, vol. 10, pp. 454–459.
- Rikhvanov L.P., Deriglazova M.A., Baranovskaya N.V., Matveenko I.A. Mineralogical and geochemical features of human body ash residue of spatially-localized technogenic system (Norilsk city). *IOP Conference series: Earth and Environmental science*, 2016, no. 43. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/43/1/012039/pdf> (accessed 17 January 2017).
- Bernhardt A., Gysi N. *The world's worst 2013: the top ten toxic threats*. Switzerland, Blacksmith Institute and Green Cross, 2013. 36 p.
- Paderin P.G., Onishchenko A.N., Lazarev F.D., Kiprilyuk P.V. *Operezhayushchie geofizicheskie issledovaniya v predelakh Khataysko-Rybinskogo podnyatia s tselyu otsenki perspektiv medno-nikelevogo orudneniya* [Leading geophysical survey within Khataysko-Rybninsk raising in order to assess the prospects of copper-nickel mineralization]. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2014. 866 p.
- Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2015 godu» [State report «About the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2015»]. Moscow, Minprirody Rossii; NIA-Priroda Publ., 2016. 639 p.
- Golubchikov S. Gorod, v kotorom dyshat seroy [The city, where people are breathing the sulfur]. *Biologiya*, 2001, no 4. Available at: <http://bio.1september.ru/article.php?ID=200100408/> (accessed 12.02.2016).
- Velyuzhinets G.A. *Pylegazovye potoki i ratsionalnye napravleniya ikh optimizatsii pri pererabotke sulfidnykh medno-nikelevykh rud (na primere ZF OAO «GKM Norilskiy Nikel»)*. Dis. Kand. nauk [Powder-gas flows and reasonable ways of optimization in the processing of copper-nickel sulfide ores. Cand. Diss.]. St. Petersburg, 2015. 230 p.
- Kurkatov S.V., Tikhonova I.V., Ivanova O.Yu. Assessment of the risk of environmental atmospheric pollutants for the health of the population of the city of Norilsk. *Hygiene and sanitation*, 2015, no. 2, pp. 28–31. In Rus.
- Ananina O.A. Cancer incidence among population of Norilsk. Formation of high risk groups. *Siberian journal of oncology*, 2013, no. 4, pp. 58–61. In Rus.
- Krebs A. The radioactivity of the human being. *Science*, 1954, vol. 120, pp. 429–431.
- Hursh J.B., Gates A.A. Body radium content of individuals with no known occupational exposure. *Nucleonics*, 1950, vol. 7, pp. 49–59.
- Muth H., Rajewsky B., Hantke H.J. The normal radium content and the Ra-226/Ca ratio of various foods, drinking water and different organs and tissues of the human body. *Health Physics*, 1960, vol. 2, pp. 239–245.

14. Shevchenko E.V., Korzhuev A.V., Moskvina N.A. The study of long-living Ra (226) isotope in human bone tissues: a historical aspect. *The Siberian Medical Journal*, 2012, no. 3, pp. 143–145. In Rus.
15. Betts F., Blumenthal N.C., Posner A.S. Bone mineralization. *Journal of Crystal Growth*, 1981, vol. 53, pp. 63–73.
16. Korago A.A. *Vvedenie v biomineralogiyu* [Introduction to biomineralogy]. St. Petersburg, Nedra Publ., 1992. 280 p.
17. Gerk S.A., Golovanova O.A. Elementny sostav kostnoy tkani cheloveka v norme i pri patologii [Elemental composition of normal and pathological human bone tissue]. *Vestnik Omskogo universiteta*, 2015, no. 4, pp. 39–44.
18. Lemesheva S. A. Khimicheskiy sostav, svoystva kostnogo apatita i ego analogov. Dis. kand. nauk [Chemical composition and properties of bone apatite and its analogues]. Moscow, 2010. 155 p.
19. Yang H., Sun H.J., Downs R.T. Hazenite, $\text{KNaMg}_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$, a new biologically related phosphate mineral, from Mono Lake, California, U.S.A. *American Mineralogist*, 2011, vol. 96, pp. 675–681.
20. Yang H., Sun H.J. Crystal structure of a new phosphate compound $\text{Mg}_2\text{KNa}(\text{PO}_4)_2 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$. *Journal of Solid State Chemistry*, 2004, vol. 177, pp. 2991–2997.
21. Schierl R., Fries H.G., van de Weyer C., Fruhmann G. Urinary excretion of platinum from platinum-industry workers. *Occupational and Environmental Medicine*, 1998, vol. 2, no. 2, pp. 138–140.
22. *Fourth National Report on human exposure to Environmental Chemicals*. Atlanta, Department of Health and Human Services, Center for disease control and prevention, 2009. 520 p.
23. *Fourth National Report on human exposure to Environmental Chemicals*. Updated Tables. Atlanta, U.S. Department of Health and Human Services, 2017. 640 p.
24. Caricchi L., Simpson G., Schaltegger U. How much magma is hiding beneath our feet? University of Geneva, 2014. Available at: http://www.unige.ch/sciences/Actualites/2014/News-230714-1_en.html (accessed 15 March 2016).
25. Censi P., Darrah T.H., Erel Y. *Medical geochemistry. Geological materials and health*. New York, London, Springer Dordrecht Heidelberg, 2013. 194 p.
26. Sahai N. Medical Mineralogy and Geochemistry: an Interfacial Science. *Elements*, 2007, vol. 3, pp. 381–384.
27. Boskey A. Mineralization of bones and teeth. *Elements*, 2007, vol. 3, pp. 385–391.
28. Liebscher K., Smith H. Essential and non-essential trace elements. *Archives of Environmental Health*, 1968, vol. 17, no. 2, pp. 881–890.
29. Sokol E.V. Mikroelementny sostav nefrolitov kak marker vozdeystviya okruzhayushchey sredy na cheloveka [Microelement composition of nephroliths as a marker of environmental impact on person]. *Geoecologia. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*, 2007, no. 2, pp. 151–163.
30. Fibini B., Fenoglio I. Toxic potential of mineral dusts. *Elements*, 2007, vol. 3, pp. 407–414.
31. *Spravochnik po redkim metallam* [Rare metals handbook]. Translated from English, ed. by V.E. Plyushchev. Moscow, Mir Publ., 1965. 946 p.

Received: 18 August 2017.

Information about the authors

Leonid P. Rikhvanov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Maria A. Deriglazova, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Natalia V. Baranovskaya, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.01/.03

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПО ПОКАЗАНИЯМ ДАТЧИКА ДЕФОРМАЦИЙ ИНТЕГРАЛЬНОГО ТИПА ПЕРЕМЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Сызранцев Владимир Николаевич¹,

v_syzrantsev@mail.ru

Сызранцева Ксения Владимировна¹,

kv.syzr@gmail.com

¹ Тюменский индустриальный университет,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

Актуальность работы. Сокращение сроков создания и освоения производства новых образцов машин, повышение их надежности и долговечности являются важнейшими задачами на любом этапе развития машиностроения. Период доработки изделий может быть сокращен с помощью экспериментальных методов, которые позволяют на ранних стадиях испытаний установить характер распределения циклических напряжений (деформаций) на исследуемых поверхностях деталей, оценить их работоспособность и усталостную прочность. Возможности экспериментальных методов существенно расширяются при использовании для оценки уровня циклических напряжений датчиков деформаций интегрального типа, изготавливаемых из фольги со специальными свойствами. Накопленный опыт применения этих датчиков свидетельствует, что с их помощью решается широкий спектр задач по определению характера изменения напряжений на поверхностях деталей и несущих систем машин, восстановлению закона распределения напряжений и определению эквивалентных напряжений, оценке мест и сроков вероятного разрушения деталей в процессе стеновых и эксплуатационных испытаний машин. В то же время реализация разработанных методов применения датчиков деформаций интегрального типа в процессе эксплуатации изделий выявила ряд проблем, связанных как с мониторингом реакции датчиков, так и неопределенностью продолжительности испытаний, вследствие наличия у датчиков инкубационного периода до появления на них реакции. Важнейшей задачей прогнозирования долговечности деталей, металлоконструкций машин, нефтегазопроводов, подвергаемых в условиях эксплуатации случайному спектру циклического деформирования, является оценка накопленных усталостных повреждений металла. Решение данной задачи требует разработки моделей, связывающих реакцию на датчиках деформаций интегрального типа с уровнем повреждений, получаемых датчиками в процессе их деформирования на изделиях.

Цель исследования: для решения задач прогнозирования ресурса деталей машин, нефтегазопроводов разработать методики: измерения напряжений, расчета эквивалентных напряжений и эквивалентных чисел циклов нагружения по повреждающему воздействию на основе применения датчиков деформаций интегрального типа с переменной чувствительностью к амплитуде циклического нагружения, не имеющих инкубационных периодов, позволяющих регистрировать реакцию датчиков в любой момент испытаний изделия.

Методы исследования: кинетическая теория механической усталости, численные методы решения трансцендентных уравнений, сопротивление материалов.

Результаты: Рассмотрена технология изготовления датчика деформаций интегрального типа с переменной чувствительностью. Для рабочей части датчика, на которой реакция на нем отсутствует, на основе кинетической теории механической усталости определено изменение накопленных повреждений, полученных в процессе предварительной наработки датчика. Решены задачи определения напряжений и прогнозирования медианного числа циклов до разрушения детали по показаниям датчика деформаций интегрального типа с переменной чувствительностью. Для условий работы детали при блочном режиме нагружения по реакции датчика деформаций интегрального типа с переменной чувствительностью решены задачи определения эквивалентного по повреждающему воздействию напряжения и эквивалентного по повреждающему воздействию чисел циклов деформирования.

Ключевые слова:

Датчики деформаций интегрального типа, переменная чувствительность, кинетическая теория механической усталости, циклические напряжения, усталостные повреждения, эквивалентные напряжения, долговечность.

Датчики деформаций интегрального типа и их применение для оценки нагруженности и долговечности деталей и несущих конструкций машин

При оценке технического состояния изделий в процессе эксплуатации важнейшей задачей является определение их остаточного ресурса. Решение этой задачи выполняется на основе кривой усталости (кривой Веллера) [1], аппроксимирующей результаты испытаний образцов на долговечность по числу циклов деформирования (N) до разрушения при различных, но постоянных для каждого образца, амплитудах напряжений (σ_a). Для описания кривых усталости традиционно используются

удобные с позиций обработки экспериментальных данных степенные зависимости [1–4]. При этом предполагается, что за каждый i -й цикл деформирования образец получает повреждение $D_i=1/N$, а поломка образца происходит по достижении ве-

личины повреждения $a_N = \sum_{i=1}^N D_i = 1$. В то же время

обработка результатов усталостных испытаний свидетельствует, что фактическая величина a_N от единицы может отличаться на три порядка ($0,01 \leq a_N \leq 10$) [2]. С целью приближения результатов экспериментов к расчетным данным прогнозирования ресурса на основе кривой Велера исполь-

зуются регрессионные зависимости, корректирующие a_N [1, 3], либо значение a_N принимается [5] равным 0,3 (из предположения о распределении a_N по нормальному закону со средним значением $\bar{a}_N=1$ и среднеквадратическим отклонением равным 0,3), что соответствует левой границе 95 % доверительного интервала разрушения образцов.

При эксплуатации изделий возникающие в них напряжения во времени изменяются либо в соответствии с блоком нагружения, либо представляют собой процесс случайный [1–5]. В настоящее время для регистрации в процессе работы изделий напряжений в подавляющем большинстве случаев используются тензорезисторы [6], реализующие дифференциальный способ измерения. Несмотря на отработанную технологию изготовления тензорезисторов, удобство получения с их помощью информации о возникающих на поверхности деталей деформаций, тензорезисторы имеют ряд недостатков, исключающих их использование при экспериментальном исследовании нагруженности и долговечности косозубых цилиндрических передач, передач с зацеплением Новикова, колес планетарных передач в процессе их работы как на стендах, так и в составе приводов машин при их эксплуатационных испытаниях. Поскольку для прогнозирования ресурса деталей в условиях случайного спектра нагружения кривая усталости непосредственно использоваться не может, на основе зафиксированного с помощью тензорезисторов случайного процесса изменения напряжений необходимо определить эквивалентные напряжения (σ_E). Во то же время известные процедуры схематизации случайных процессов (метод размахов, полуциклов, падающего дождя и другие) накопление усталостных повреждений не учитывают, что не позволяет корректно определить величину σ_E . Аналогичная ситуация имеет место и при установлении величины эквивалентного числа циклов (N_E) при случайном спектре нагружения изделия, когда процесс деформирования к гармоническому преобразовать возможным не представляется.

Проблемы определения нагруженности и прогнозирования долговечности деталей и конструкций машин в эксплуатации потребовали, начиная со второй половины прошлого столетия, разработки новых средств регистрации деформаций, обеспечивающих измерение напряжений в условиях циклического деформирования деталей. Наиболее эффективные результаты получены в двух направлениях. Первое направление связано с использованием тензорезисторов, материал которых подвергается отжигу (способ запатентованный специалистами фирмы Боинг). Такие тензорезисторы (датчики усталостных повреждений, $S-N$ датчики [4, 7, 8]) изменяют свое омическое сопротивление по мере циклического деформирования. Проблемой использования этих датчиков при оценке напряжений (при случайном характере нагружения) и прогнозирования ресурса, не решенной до на-

стоящего времени, несмотря на усилия ученых различных стран, является отсутствие математических моделей, связывающих накопленные усталостные повреждения в материале детали с изменением омического сопротивления датчика.

Основой второго направления можно считать работу [9], в которой для определения напряжений, возникающих на поверхности детали при ее циклическом деформировании, использованы медные или никелевые гальванические покрытия. На поверхности покрытия в процессе деформирования возникает реакция в виде «темных пятен», относительная площадь которых и момент появления коррелируют с числом циклов и амплитудой напряжений. Для прочного соединения с деталью процесс осаждения покрытий выполнялся с использованием цианистых электролитов, при этом реакция на покрытии возникала через несколько миллионов чисел циклов деформирования. Разработанные методы использованы при определении циклических напряжений на поверхностях деталей [10–13].

Поскольку за счет разницы потенциалов на границе сцепления гальваническое покрытие снижает долговечность деталей, прогнозировать их ресурс на основе обработки реакции покрытия не представляется возможным. В процессе развития данного направления вместо гальванического покрытия предложено использовать датчики деформаций интегрального типа (ДДИТ), вырезаемые требуемой конфигурации из электроосажденной фольги [14–16] и помещаемые (наклеиваемые) на исследуемое место детали. Для получения медной фольги использовались менее токсичные серноокислые электролиты [14]. Путем варьирования параметров электролиза и термической обработки фольги удалось до 30 % сократить число циклов деформирования до реакции ДДИТ [14, 16]. Помимо оценки реакции ДДИТ по моменту возникновения на поверхности датчика первых «темных пятен» предложены и другие способы [14, 17–19], разработаны и реализованы методики определения циклических напряжений для различных деталей и конструкций машин [10, 11, 14, 17, 20].

Сократить на два–три порядка число циклов деформирования деталей при определении амплитуды напряжений позволили ДДИТ, изготовленные на основе алюминиевой фольги, подвергнутой специальной термомеханической обработке [21–24]. В нашей стране исследованием свойств медных и алюминиевых ДДИТ, разработкой методик их применения для регистрации циклических напряжений и прогнозирования ресурса деталей ведутся с 80-х гг. прошлого столетия. Результаты выполненных исследований отражены в работах [14, 17, 20], в которых описаны различные способы оценки реакции ДДИТ (по первым «темным пятнам», по относительной площади «темных пятен», по изменению микротвердости датчика, по изменению отраженного от поверхности датчика потока инфракрасного излучения), разработа-

ны модели, описывающие тарировочные зависимости. Приведены примеры исследования с помощью ДДИТ характера распределения напряжений в различных деталях и металлоконструкциях машин, определения мест с интенсивным накоплением усталостных повреждений, прогнозирования ресурса несущих систем машин как для условий стендовых, так и эксплуатационных испытаний изделий.

Последнее десятилетие характеризуется расширением исследований свойств ДДИТ, способов обработки информации с датчиков, применением ДДИТ при оценке технического состояния изделий в процессе эксплуатации. В работах [25, 26] на основе теории распознавания образов предложены алгоритмы обработки цифровых снимков реакции на датчиках. Для исследования характера распределения напряжений в сварных образцах и в вершине усталостной трещины разработаны способы тарирования датчиков с использованием результатов расчета напряженно-деформированного состояния образцов методом конечных элементов [27, 28]. С целью определения напряжений при квазистатическом деформировании деталей предложено в качестве материала датчика использовать индиевую или оловянную фольгу [29, 30]. Совершенствуется аппаратура для регистрации реакции ДДИТ по изменению отраженного от поверхности датчика светового потока [31]. Разрабатываются методики определения по показаниям ДДИТ напряжений в процессе эксплуатации транспортных и грузоподъемных машин [32, 33] для оценки нагруженности и ресурса их элементов. В последние годы в Томском политехническом университете под руководством профессора С.В. Панина выполняются исследования по оценке с помощью алюминиевых ДДИТ циклических напряжений в деталях, изготовленных из композитных материалов на основе углеродных волокон [34–39]. Особенности разрушения таких деталей вследствие усталости потребовали разработки специальных устройств по регистрации реакции датчиков, алгоритмов ее обработки с целью получения дополнительных информационных параметров, отражающих различные стадии процесса накопления в композитных материалах усталостных повреждений. Выполняемые исследования ориентированы на создание системы неразрушающего контроля диагностики технического состояния изделий в эксплуатации.

Математическое обеспечение процесса тарирования датчиков деформаций интегрального типа, имеющих переменную чувствительность

Для изготовления вышерассмотренных ДДИТ используется металлическая фольга, чувствительность которой к накопленным усталостным повреждениям, оцениваемая по реакции датчиков, в пределах фольги не меняется. Анализ опыта определения с помощью таких ДДИТ характера распределения напряжений в местах их концен-

трации на различных деталях и металлоконструкциях машин в процессе их эксплуатационных испытаний выявил две проблемы. Первая проблема возникает при реализации ряда методик решения задач, основой которых является фиксация на ДДИТ момента появления первых «темных пятен». Возможность получения такой информации в процессе циклического деформирования изделия является не только процессом трудоемким, требующим многократного осмотра поверхности датчика, но и нередко связанным с необходимостью разборки-сборки изделия с целью обеспечения доступа к датчику. Более того, мониторинг реакции датчиков выполняется только при неработающем оборудовании, однако во многих случаях его остановка в произвольные моменты времени невозможна, поскольку определяется технологическим и техническим регламентами эксплуатации изделия. Если же момент возникновения первых «темных пятен» на ДДИТ не зафиксирован, то реализовать методику восстановления напряжений по показаниям ДДИТ возможным не представляется.

Вторая проблема связана с тем, что в процессе исследования характера распределения напряжений на исследуемой поверхности детали с помощью ДДИТ амплитуда напряжений неизвестна, поэтому априори установить продолжительность циклического деформирования детали до возникновения реакции на ДДИТ возможным не представляется. Если амплитуда мала, то на ДДИТ реакция может вообще не появиться.

Решить проблемы позволяют ДДИТ, изготовленные по технологии, предложенной в работе [40]. Суть ее заключается в следующем. Обратимся к рис. 1, на котором представлена традиционная схема тарирования датчика (по критерию первых «темных пятен»), представляющего собой полосу гальванической фольги, помещенного (наклеенного) на коническую рабочую часть цилиндрического образца. Образец подвергается циклическому деформированию на машине усталостных испытаний (МУИ) в условиях изгиба с вращением.

Целью данного способа тарирования ДДИТ [14, 17] является определение функциональной зависимости числа циклов деформирования (N) от амплитуды напряжений (σ_a) по критерию возникновения на поверхности ДДИТ первых «темных пятен». Фотографии на рис. 1 свидетельствуют, что процесс тарирования близок к завершению, поскольку реакция на ДДИТ занимает порядка 70 % его длины. Отметим, что в процессе циклического деформирования образца с ДДИТ, датчик, как и образец, накапливает усталостные повреждения, величина которых, при возникновении на датчике первых «темных пятен», является постоянной, зависящей от материала ДДИТ и его термомеханической обработки [14, 17]. Следуя работе [40], реализуем только начальную стадию тарирования ДДИТ, соответствующую появлению первых «темных пятен» в зоне минимального диаметра

тра образца. Зафиксируем рискуй на датчике положение границы первых «темных пятен», после чего, растворив клеевую прослойку ДДИТ, снимем его с образца. На этом датчике имеются две зоны, разделенные границей первых «темных пятен». Слева от границы на поверхности датчика реакция присутствует, а справа от границы, в рабочей части датчика, реакция отсутствует, несмотря на то, что в ходе предварительной наработки датчика на образце материал датчика усталостные повреждения получил. Величина накопленных усталостных повреждений по длине рабочей части датчика является переменной – она уменьшается при удалении вправо от границы. Описанная технология позволяет изготавливать датчик интегрального типа с переменной чувствительностью (ДДПЧ), который имеет ряд, принципиально важных по сравнению с ДДИТ, преимуществ:

- инкубационный период у ДДПЧ отсутствует;
- значительно упрощается процедура фиксации реакции ДДПЧ, заключающаяся в регистрации линейного перемещения границы первых «темных пятен» по длине рабочей части ДДПЧ;
- реакция на ДДПЧ может быть зафиксирована в любой момент процесса испытаний исследуемой детали или металлоконструкции.

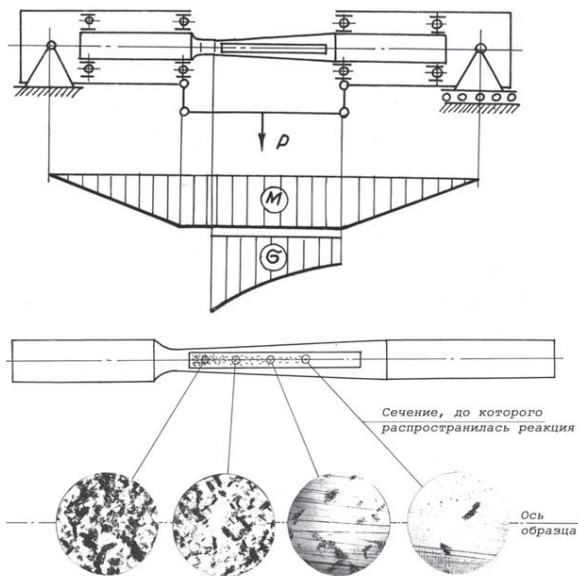


Рис. 1. Тарирование ДДИТ в процессе циклического деформирования образца на машине усталостных испытаний (МУИ)

Fig. 1. Integral Strain Gauge (ISG) calibrating during cyclic deforming of specimen on fatigue testing machine

Выше было отмечено, что в процессе изготовления ДДПЧ материал его рабочей части получает усталостные повреждения. Закон изменения этих повреждений по длине рабочей части датчика определяется геометрией образца, с использованием которого выполняется наработка ДДПЧ, и видом напряженно-деформированного состояния образца в процессе его циклического деформирования.

На рис. 1 показан цилиндрический образец с конической рабочей частью. Нарботка датчиков может осуществляться на плоских образцах в процессе их циклического деформирования в условиях растяжения или изгиба. Используя различную геометрическую форму плоского или цилиндрического образца, можно варьировать величину накопленных усталостных повреждений материала ДДПЧ и ее изменение в пределах его рабочей части.

Рассмотрим задачу определения функциональной зависимости изменения накопленных усталостных повреждений по длине рабочей части ДДПЧ, являющейся для этих датчиков калибровочной зависимостью. Известно [1, 3, 5], что наиболее достоверным способом получения информации об усталости материала является построение кривой усталости (кривой Велера). Традиционно математически кривая Велера описывается степенной зависимостью [1, 3, 5], не имеющей физического наполнения, но позволяющей эту кривую в плоскости параметров $\sigma_a - \lg N$ или $\lg \sigma_a - \lg N$ представить в виде прямой линии и определять ее параметры методом линейного регрессионного анализа.

Другим подходом к описанию кривых усталости является использование полуэмпирических моделей [1, 41, 42]. Несмотря на более высокую их сложность и, как правило, необходимость использования численных методов при определении значений параметров моделей, они позволяют рассчитывать величину повреждения материала при его циклическом деформировании. В настоящей работе для решения задачи воспользуемся полуэмпирическими моделями, разработанными в рамках кинетической теории механической усталости [2, 41, 42], на основе которой для кривой малоциклового усталости получено следующее выражение [2]:

$$N = (1 - 10^{\frac{\sigma_a - \bar{\sigma}_b}{9}}) Q_T B_0 \ln[1 - \exp(A_0 C_0 \sigma_a)], \quad (1)$$

где

$$B_0 = \frac{\ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{\bar{\sigma}_b - \sigma_R}{\sigma_R - \sigma_{RT}} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}}{\bar{\sigma}_b};$$

$$\tilde{N}_0 = - \frac{\bar{\sigma}_b}{(\sigma_R - \sigma_{RT})(\sigma_b - \sigma_R)}; \quad A_0 = D / (1 - D);$$

Q_T – коэффициент, характеризующий сопротивление детали росту усталостных трещин; σ_R – предел выносливости детали при коэффициенте асимметрии цикла R ; σ_{RT} – циклический предел текучести; $\bar{\sigma}_b$ – среднее значение предела прочности материала; ϑ – угол наклона кривой усталости в системе координат $\lg N - \sigma_a$; D – величина поврежденности материала от $D = D_0 \geq 0$, характеризующей начальное повреждение материала образца, которое имеет место еще до начала его циклического деформирования, вплоть до предельной величины $D = D_i \leq 1$, соответствующей разрушению образца вследствие накопленных усталостных повреждений.

Методики определения входящих в уравнение (1) параметров: Q_T^* , σ_R^* , σ_{RT}^* , ϑ^* , $D=D_0$ на основе данных σ_{ai} , N_i , $i=1, n$ испытаний образцов на долговечность и определенной в результате разрушения образцов на разрывной машине величины $\bar{\sigma}_b$ изложены в работе [2]. На момент решения поставленной задачи считаем, что параметры уравнения (1) являются известными.

Возвратимся к процессу изготовления ДДПЧ на МУИ (рис. 1) путем предварительной наработки датчика на конической рабочей части тарировочного образца. Подвергнем образец с ДДИТ циклическому деформированию в течение N_g числа циклов, до момента возникновения в левой части датчика (рис. 1) реакции в виде «темных пятен», и зафиксируем диаметр d_g сечения конической рабочей части тарировочного образца, соответствующего границе первых «темных пятен». В этом сечении образца действовало напряжение σ_{ag} .

Рассчитаем величину поврежденности материала образца D_g в его сечении, определяемом диаметром d_g . Воспользуемся выражением (1) при $N=N_g$ и $\sigma_a=\sigma_{ag}$. Учитывая, что в данном случае $D_g=D_0+D$, в уравнении (1) остается лишь одно неизвестное – D_g . Для его определения обозначим:

$$E_0 = (\sigma_{ag})^{-1} \ln \left\{ 1 - \exp \left[\frac{N_{gn}}{P_0 Q_T^* B_0} \right] \right\}, \quad (2)$$

где

$$P_0 = 1 - 10^{(\sigma_{ag} - \bar{\sigma}_b) / \vartheta^*},$$

$$B_0 = \frac{\ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{\bar{\sigma}_b - \sigma_R^*}{\sigma_R^* - \sigma_{RT}^*} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}}{\bar{\sigma}_b},$$

$$\tilde{N}_0 = - \frac{\bar{\sigma}_b}{(\sigma_R^* - \sigma_{RT}^*)(\bar{\sigma}_b - \sigma_R^*)},$$

$$N_{gn} = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_{ag} - \bar{\sigma}_b}{\vartheta^*}} \right) Q_T^* B_0 \ln [1 - \exp(A_0 C_0 \sigma_{ag})] - N_g,$$

$$A_0 = D_0 / (1 - D_0),$$

с учетом которых получим выражение для расчета величины D_g :

$$D_g = D_0 + E_0 / (E_0 + C_0). \quad (3)$$

Рассмотрим задачу расчета поврежденности материала образца D_x в сечениях его рабочей части, определяемых диаметром $d_x > d_g$. Для описания этих сечений введем продольную координату x_g для датчика: в сечении $x_g=0$, в сечении d_x величина $0 < x_g \leq L$, где L – длина рабочей части датчика. Поскольку тарировочный образец имеет коническую форму, накопленные повреждения в сечениях его рабочей части, определяемые координатой $0 < x_g \leq L$, будут переменными, то есть величина D_x является функцией от x_g : $D_x(x_g)$.

Из рис. 1 следует, что диаметр рабочей части образца в сечении d_x рассчитывается по зависимости:

$$d_x = 2 \operatorname{tg} \alpha x_g + d_g, \quad (4)$$

а действующее в сечении d_x напряжение σ_{ax} по формуле:

$$\sigma_{ax}(x_g) = 32M / (\pi d_x^3), \quad (5)$$

где α – угол конуса рабочей части тарировочного образца; M – изгибающий момент, при котором образец подвергается циклическому деформированию на МУИ.

Для определения зависимости $D_x(x_g)$ – поврежденности материала образца в любом его сечении, определяемом координатой $x_g = \text{const}$, аналогично формулам (2) и (3), учитывая (4) и (5) – получим выражения:

$$D_x(x_g) = D_0 + E_0(x_g) / [E_0(x_g) + C_0], \quad (6)$$

где

$$E_0(x_g) = [32M / (\pi d_x^3)]^{-1} \ln \left\{ 1 - \exp \left[\frac{N_{gn}(x_g)}{P_0(x_g) Q_T^* B_0} \right] \right\},$$

$$P_0(x_g) = 1 - 10^{[32M / (\pi d_x^3) - \bar{\sigma}_b] / \vartheta^*},$$

$$N_{gn}(x_g) = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_{ax}(x_g) - \bar{\sigma}_b}{\vartheta^*}} \right) Q_T^* B_0 \ln [1 - \exp(A_0 C_0 \sigma_{ax}(x_g))] - N_g.$$

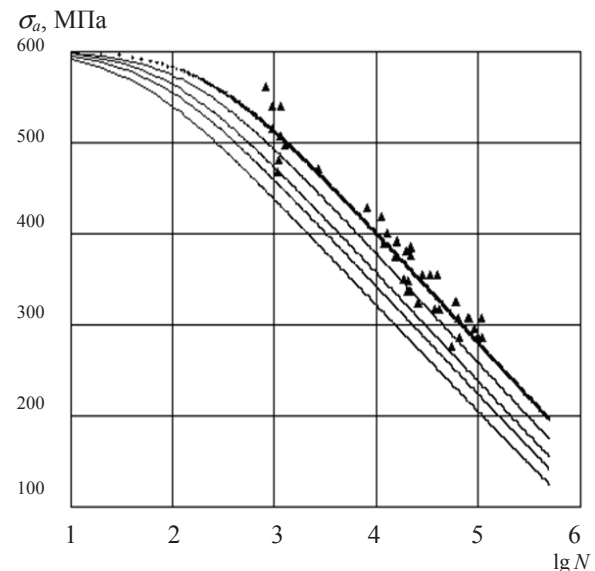


Рис. 2. Медианная кривая малоциклового усталости с различной величиной поврежденности материала

Fig. 2. Median curve of low-cycle fatigue at different values of material damage

Описанную технологию изготовления и тарирования ДДПЧ проиллюстрируем на следующем примере. Обратимся к работе [2], в которой представлены данные испытаний образцов из трубной стали на малоцикловую усталость. Результаты ис-

питаний (темные треугольники) в плоскости параметров $\lg N - \sigma_a$ отражены на рис. 2, на котором также показана медианная кривая усталости (толстая линия), построенная на основе модели (1).

Параметры модели (1), описывающие данные испытаний (рис. 2), имеют значения: $\sigma_b = 602,1$ МПа; $Q_T^* = 1,53 \cdot 10^6$; $\sigma_R^* = 263,621$ МПа; $\sigma_{RT}^* = 201,914$ МПа; $\vartheta^* = -121,811$; $D_0 = 6,006 \cdot 10^{-11}$.

В процессе циклического деформирования детали ее материал накапливает усталостные повреждения (учитываемые в модели (1) параметром D : $D_0 \leq D \leq D_k \leq 1$), приводящие к смещению медианной кривой усталости в сторону меньшего числа циклов нагружения до поломки образцов. В качестве иллюстрации на рис. 2 показаны медианные кривые малоциклового усталости (справа налево), рассчитанные по выражению (1) при различных величинах D : $D_0 = 6,006 \cdot 10^{-11}$ (1/цикл) (исходная поврежденность материала), 10^{-7} ; 10^{-5} ; 10^{-4} ; 10^{-3} (1/цикл).

Для изготовления ДДПЧ воспользуемся тарировочным образцом с конической рабочей частью (рис. 1), имеющим угол $\alpha = 0,5^\circ$, на которую наклеим ДДИТ в виде полоски из алюминиевой фольги. Осуществим процесс наработки датчика на МУИ при величине $M = 3,682 \cdot 10^3$ Н·М в течение $N_g = 5000$ чисел циклов деформирования. В результате циклического деформирования ДДИТ на его поверхности в сечении образца диаметром $d_g = 5$ мм зафиксирована реакция в виде первых «темных пятен». На основании формулы (5) в этом сечении действовало напряжение $\sigma_a = 300$ МПа. Величину поврежденности материала образца D_g , соответствующую на поверхности датчика границе первых «темных пятен», рассчитаем по выражению (3): $D_g = 3,496 \cdot 10^{-10}$ (1/цикл). Зависимость $D_x(x_g)$ изменения поврежденности ДДПЧ в пределах его длины $L = 20$ мм определяется уравнением (6) с учетом (4) и (5) при варьировании x_g в диапазоне $0 < x_g \leq L$. Вид полученной зависимости $D_x(x_g)$ показан на рис. 3.

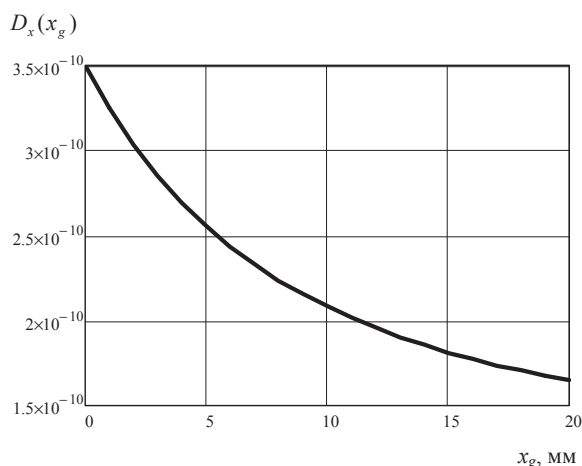


Рис. 3. Изменение поврежденности по длине ДДПЧ

Fig. 3. Change of damage in VSISG length

Методики определение напряжений и прогнозирования долговечности на основе показаний датчиков деформаций интегрального типа с переменной чувствительностью

Основой методик определения напряжений, возникающих в трубопроводах и металлоконструкциях машин, подвергающихся при эксплуатации циклическому деформированию, с использованием ДДИТ является тарировочная зависимость, связывающая амплитуду напряжений и число циклов нагружения, построенная по критерию появления на поверхности датчика первых «темных пятен» [14, 17]. Тарировочная зависимость ДДПЧ (рис. 3) по величине x_g смещения границы первых «темных пятен» на рабочей части датчика позволяет установить величину поврежденности $D_x(x_g)$, а не амплитуду напряжений σ_a . Для определения по реакции ДДПЧ амплитуды напряжений, прогнозирования долговечности трубопровода необходимо специализированное методическое обеспечение, рассматриваемое далее.

Методика 1 определения с помощью описанного в п. 2 ДДПЧ амплитуды напряжения σ_a на участке поверхности трубопровода в процессе его циклического деформирования из условия, что за число циклов $N_d = 1000$ граница первых «темных пятен» на поверхности ДДПЧ сместилась на величину $x_g = 12$ мм. Кривая усталости материала трубы (рис. 2), связывающая число циклов до ее разрушения $N(\sigma_a)$ с амплитудой напряжения σ_a , при которой осуществляется циклическое деформирование трубы, на основании выражения (1) имеет вид:

$$N(\sigma_a) = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_a - \sigma_b}{\vartheta^*}} \right) Q_T^* B_0 \ln[1 - \exp(A_0 C_0 \sigma_a)], \quad (7)$$

где $A_0 = D_0 / (1 - D_0)$.

Величина поврежденности $D_x(x_g)$ рабочего участка ДДПЧ в любом его сечении, задаваемом продольной координатой x_g , представлена на рис. 3. Определим поврежденность $D_x(x_g)$ при $x_g = 12$ мм, которую должен получить датчик через N_d число циклов деформирования вместе с трубопроводом, чтобы в этом сечении датчика возникли первые «темные пятна». Воспользовавшись зависимостями (4)–(6), при $x_g = 12$ мм последовательно вычислим:

$$d_{g,x} = 2 \operatorname{tg} \alpha x_g + d_g; \quad \sigma_{g,x} = 32M / (\pi d_{g,x}^3); \quad (8)$$

$$N_{g,x} = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_{g,x} - \sigma_b}{\vartheta^*}} \right) \times Q_T^* B_0 \ln[1 - \exp(A_0 C_0 \sigma_{g,x})] - N_g - N_d; \quad (9)$$

$$P_{0,x} = 1 - 10^{[\sigma_{g,x} - \sigma_b] / \vartheta^*};$$

$$E_{0,x} = [\sigma_{g,x}]^{-1} \ln \left\{ 1 - \exp \left[\frac{N_{g,n}}{P_{0,n} Q_T^* B_0} \right] \right\}; \quad (10)$$

$$D_{g,x} = D_0 + D_g - E_{0x} / (E_{0x} - C_0). \quad (11)$$

После чего на основе уравнения (1) определим зависимость $N_x(\sigma_a)$ числа циклов от напряжения σ_a до разрушения трубопровода, поврежденность которого соответствует величине D_{gx} :

$$N_x(\sigma_a) = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_a - \bar{\sigma}_b}{\vartheta^*}}\right) Q_T^* B_0 \ln[1 - \exp(A_{0x} C_0 \sigma_a)], \quad (12)$$

где $A_{0x} = D_{gx} / (1 - D_{gx})$.

В результате имеем две зависимости для расчета числа циклов до разрушения: первая (7), не учитывающая циклическое деформирование трубопровода с ДДПЧ, и вторая (12), отражающая снижение долговечности трубопровода вследствие накопления усталостных повреждений в период его работы с датчиком. Поскольку рассчитанные по выражениям (7) и (12) числа циклов отличаются на N_d , имеем следующее уравнение:

$$N(\sigma_a) = N_x(\sigma_a) + N_d. \quad (13)$$

Данное уравнение, учитывая зависимости (7) и (12), относительно σ_a является трансцендентным, и его решение осуществляется численным методом.

Для принятых исходных данных ($x_g = 12$ мм, $N_d = 1000$ циклов) в результате решения уравнения (13) определено $\sigma_a = 379,356$ МПа. В том случае, если реакция на ДДПЧ $x_g = 12$ мм возникла при $N_d = 2000$ циклов, $\sigma_a = 338,477$ МПа, если же при $N_d = 5000$ циклов, $\sigma_a = 244,041$ МПа. Результаты расчетов свидетельствуют, чем больше требуется число циклов деформирования для возникновения в сечении датчика $x_g = 12$ мм реакции в виде первых «темных пятен», тем меньшая величина амплитуды действует на исследуемой поверхности трубопровода.

Методика 2 определения медианного значения числа циклов до разрушения трубопровода, подвергаемого в процессе эксплуатации циклическому нагружению в течение $N_1 = 10000$ циклов при $\sigma_{a1} = 350,0$ МПа, после чего трубопровод продолжает эксплуатироваться при другой величине амплитуды напряжений $\sigma_{a2} = 330,0$ МПа. Кривая усталости для материала трубопровода представлена на рис. 2.

Данная задача имеет важное методическое значение. При использовании для ее решения кривой усталости в традиционной форме (в виде степенной или иной математической зависимости, аппроксимирующей данные испытания образцов на долговечность) оценить ресурс детали возможным не представляется. Здесь обычно реализуемый прием расчета эквивалентных напряжений при известных параметрах ступеней блока нагружения не применим, поскольку как таковой блок нагружения отсутствует.

Воспользуемся выражением для кривой усталости (1). Подставляя в него $\sigma_a = \sigma_{a1}$ и $N = N_1$, получим уравнение с одним неизвестным $D = D_1 + D_0$, где D_1 – накопленное усталостное повреждение в мате-

риале детали за период ее циклического деформирования в течение $N_1 = 10000$ циклов при напряжении $\sigma_{a1} = 350,0$ МПа. Решение этого уравнения имеет вид:

$$D_1 = E_{01} / (E_{01} + C_0) - D_0, \quad (14)$$

где

$$E_{01} = (\sigma_{a1})^{-1} \ln \left\{ 1 - \exp \left[\frac{N_0 - N_1}{P_{01} Q_T^* B_0} \right] \right\};$$

$$P_{01} = 1 - 10^{(\sigma_{a1} - \bar{\sigma}_b) / \vartheta^*};$$

$$N_0 = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_{a1} - \bar{\sigma}_b}{\vartheta^*}}\right) Q_T^* B_0 \ln[1 - \exp(A_0 C_0 \sigma_{a1})];$$

$$A_0 = D_0 / (1 - D_0).$$

Входящие в уравнение (14) величины C_0 и B_0 при известных значениях параметров кривой усталости: $\bar{\sigma}_b$; Q_T^* ; σ_R^* ; σ_{RT}^* ; ϑ^* ; D_0 рассчитываются по зависимостям (2).

Установленная величина поврежденности D_1 позволяет скорректировать кривую малоциклового усталости (1) и представить ее в форме:

$$N = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_a - \bar{\sigma}_b}{\vartheta^*}}\right) Q_T^* B_0 \ln[1 - \exp(A_{01} C_0 \sigma_a)]. \quad (15)$$

Здесь $A_{01} = (D_1 + D_0) / (1 - D_1 - D_0)$.

Искомое медианное число циклов (N_2) до разрушения трубопровода при его циклическом деформировании при напряжении σ_{a2} рассчитывается на основе выражения (15) при подстановке в него $\sigma_a = \sigma_{a2}$:

$$N_2 = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_{a2} - \bar{\sigma}_b}{\vartheta^*}}\right) Q_T^* B_0 \ln[1 - \exp(A_{01} C_0 \sigma_{a2})]. \quad (16)$$

Значение числа циклов, определенное по зависимости (16), $N_2 = 23640$. Если же $\sigma_{a2} = 300,0$ МПа, то $N_2 = 42080$.

Методика 3 расчета медианного числа циклов до разрушения трубопровода (N), подвергаемого в процессе эксплуатации циклическому деформированию блоком нагружения, параметры ступеней которого известны: $\sigma_{a1} = 300,0$ МПа, $N_1 = 6000$; $\sigma_{a2} = 280,0$ МПа, $N_2 = 9000$; $\sigma_{a3} = 260,0$ МПа, $N_3 = 15000$. Кривая усталости для материала трубопровода представлена на рис. 2.

В течение блока нагружения трубопровод был подвергнут $N_p = N_1 + N_2 + N_3 = 30000$ числу циклов деформирования. Для определения долговечности трубопровода определим постоянное по амплитуде эквивалентное напряжение σ_E . При этом напряжении накопленное повреждение в трубопроводе за N_p число циклов деформирования должно быть таким же, что и в процессе эксплуатации трубопровода при заданном блоке изменения напряжений.

Воспользовавшись формулами (14) при $\sigma_{a1} = 300,0$ МПа, $N_1 = 6000$, рассчитаем накопленное усталостное повреждение в материале трубопрово-

да за первую ступень блока: $D_1=3,366 \cdot 10^{-10}$. По аналогии с выражениями (14) выпишем зависимости для расчета накопленного повреждения за вторую ступень блока D_2 :

$$D_2 = E_{02} / (E_{02} + C_0) - D_0 - D_1, \quad (17)$$

где

$$E_{02} = (\sigma_{a2})^{-1} \ln \left\{ 1 - \exp \left[\frac{N_1 - N_2}{P_{02} Q_T^* B_0} \right] \right\};$$

$$P_{02} = 1 - 10^{(\sigma_{a2} - \bar{\sigma}_b) / s^*};$$

$$N_1 = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_{a2} - \bar{\sigma}_b}{s^*}} \right) Q_T^* B_0 \ln [1 - \exp(A_1 C_0 \sigma_{a2})];$$

$$A_1 = (D_0 + D_1) / (1 - D_0 - D_1).$$

При $\sigma_{a2}=280,0$ МПа, $N_2=9000$ по формулам (17) рассчитаем $D_2=2,359 \cdot 10^{-9}$.

Для определения D_3 зависимости строятся подобным образом и имеют вид:

$$D_3 = E_{03} / (E_{03} + C_0) - D_0 - D_1 - D_2, \quad (18)$$

где

$$E_{03} = (\sigma_{a3})^{-1} \ln \left\{ 1 - \exp \left[\frac{N_2 - N_3}{P_{03} Q_T^* B_0} \right] \right\};$$

$$A_2 = (D_0 + D_1 + D_2) / (1 - D_0 - D_1 - D_2);$$

$$N_2 = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_{a3} - \bar{\sigma}_b}{s^*}} \right) Q_T^* B_0 \ln [1 - \exp(A_2 C_0 \sigma_{a3})];$$

$$P_{03} = 1 - 10^{(\sigma_{a3} - \bar{\sigma}_b) / s^*}.$$

В результате расчета по формулам (18) при $\sigma_{a3}=260,0$ МПа, $N_3=15000$ определим $D_3=2,240 \cdot 10^{-8}$.

За все три ступени блока материал трубопровода получит повреждение $D_\Sigma = \sum_{i=0}^3 D_i$, знание которого

позволяет кривую усталости по аналогии с выражениями (12), (15) представить в виде:

$$N_b(\sigma_a) = \left(1 - 10^{\frac{\sigma_a - \bar{\sigma}_b}{s^*}} \right) Q_T^* B_0 \ln [1 - \exp(A_\Sigma C_0 \sigma_a)], \quad (19)$$

где $A_\Sigma = D_\Sigma / (1 - D_\Sigma)$.

Число циклов до разрушения трубопровода, деформирование которого осуществляется при амплитуде напряжения σ_E , описывается выражением (7): $N(\sigma_E)$. Это число циклов по отношению к расчету по формуле (19) при $\sigma_a = \sigma_E$ должно отличаться на величину N_p . В результате имеем следующее трансцендентное относительно σ_E уравнение:

$$N_b(\sigma_E) + N_p - N(\sigma_E) = 0. \quad (20)$$

Решая уравнение (20) численным методом (в работе для этого в системе MathCad написана программа, в которой использована подпрограмма root решения трансцендентных уравнений), определим: $\sigma_E=276,427$ МПа. Расчет медианного числа

циклов до разрушения трубопровода, учитывая, что он уже отработал в течение N_p числа циклов, выполняется по зависимости (7) при подстановке в нее $\sigma_a = \sigma_E$ и вычитание из полученного значения величины N_p . В результате реализации описанной процедуры определим, что при продолжении работы трубопровода в условиях заданного блока нагружения он выйдет из строя через 76630 циклов.

Рассмотренная задача является промежуточной при определении по показаниям ДДПЧ эквивалентных по повреждающему воздействию чисел циклов ступеней блока, когда они заданы лишь относительными величинами, установленными на основе обработки случайного процесса нагружения трубопровода в эксплуатации.

Методика 4 определения медианного числа циклов до разрушения трубопровода, циклическое деформирование которого в процессе эксплуатации осуществлялось в течение T_Σ часов в соответствии с блоком нагружения, величины напряжений каждой ступени блока известны: $\sigma_{a1}=300$ МПа; $\sigma_{a2}=280$ МПа; $\sigma_{a3}=260$ МПа, а длительность ступеней задана относительными единицами: $t_1=0,2$; $t_2=0,3$; $t_3=0,5$.

Поскольку в данном случае длительность ступеней блока нагружения в числах циклов деформирования неизвестна, воспользоваться рассмотренной выше методикой 3 и зависимостью (7), описывающей кривую усталости, для прогнозирования долговечности трубопровода возможным не представляется. Для решения поставленной задачи до работы трубопровода на исследуемый его участок помещают ДДПЧ и осуществляют эксплуатацию трубопровода с ДДПЧ в течение времени T_Σ , по истечении которого фиксируют величину x_g смещения границы первых «темных пятен» на поверхности датчика.

Обозначим через N_Σ суммарное число циклов за время работы детали с ДДПЧ, зная которое длительность ступеней блока нагружения легко рассчитывается: $N_1=N_\Sigma \cdot t_1$, $N_2=N_\Sigma \cdot t_2$, $N_3=N_\Sigma \cdot t_3$.

Обратимся к формулам (8)–(10). Заменяя в них N_d на N_Σ , при $x_g = \text{const}$ зависимость (11), отражающую накопленную поврежденность материала (D_{gx}), представим в виде функции от N_Σ :

$$D_{gx}(N_\Sigma) = D_0 + D_g - E_{0x}(N_\Sigma) / [E_{0x}(N_\Sigma) - C_0]. \quad (21)$$

При известных σ_{a1} , σ_{a2} , σ_{a3} , учитывая, что $N_1=N_\Sigma \cdot t_1$, $N_2=N_\Sigma \cdot t_2$, $N_3=N_\Sigma \cdot t_3$, на основании зависимостей (14), (17) и (18) определим накопленную поврежденность материала за все три ступени блока нагружения в виде функции от N_Σ :

$$D_\Sigma(N_\Sigma) = D_0 + \sum_{i=1}^3 D_i(N_\Sigma). \quad (22)$$

Поскольку величина $D_{gx}(N_\Sigma)$, зафиксированная на основе обработки реакции ДДПЧ, должна совпадать с рассчитанным по формуле (22) значением $D_\Sigma(N_\Sigma)$, имеем следующее, трансцендентное относительно N_Σ , уравнение:

$$[D_{g,x}(N_{\Sigma}) - D_{\Sigma}(N_{\Sigma})] / D_0 = 0, \quad (23)$$

где функции $D_{g,x}(N_{\Sigma})$, $D_{\Sigma}(N_{\Sigma})$ описываются, соответственно, зависимостями (21), (22), а нормирующий множитель D_0 введен с целью учета малой величины слагаемых уравнения (23).

В результате решения уравнения (23) при $\sigma_{a1}=300$ МПа; $\sigma_{a2}=280$ МПа; $\sigma_{a3}=260$ МПа; $t_1=0,2$; $t_2=0,3$; $t_3=0,5$, $x_g=15$ мм для рассмотренного в методике 2 ДДПЧ установлено: $N_{\Sigma}=5013$. Полученное значение N_{Σ} позволяет рассчитать величины N_1 , N_2 , N_3 , после чего параметры ступеней блока становятся известными и для прогнозирования медианного числа циклов до разрушения детали достаточно реализовать процедуру методики 3.

Заключение

Проведен анализ зарубежных и отечественных методик определения напряжений с использованием изготавливаемых из гальванической фольги датчиков деформаций интегрального типа (ДДИТ), на поверхности которых при циклическом деформировании вместе с исследуемой деталью возникает реакция в виде «темных пятен». Показано, что наличие у ДДИТ инкубационного периода и сложность фиксации реакции на датчике в процессе испытания деталей не позволяют

осуществлять прогнозирование их долговечности по усталостной прочности на основе показаний ДДИТ. Для решения этих задач в работе предложено осуществлять предварительную наработку гальванической фольги на тарировочном образце в условиях известного, плавно изменяющегося напряженно-деформированного его состояния до появления на поверхности фольги реакции в виде «темных пятен». Изготовленные из такой фольги датчики (ДДПЧ) не имеют инкубационного периода, оценка их реакции осуществляется путем измерения перемещения границы первых «темных пятен» на поверхности датчика и может выполняться в любой момент испытания детали. На основе кинетической теории механической усталости определена функциональная зависимость изменения накопленных усталостных повреждений по длине рабочей части ДДПЧ (его чувствительного элемента), являющаяся для этих датчиков калибровочной зависимостью. Разработаны на основе зафиксированной реакции на ДДПЧ методики: определения напряжений, прогнозирования медианного числа циклов до разрушения деталей, определения эквивалентных по повреждающему воздействию напряжений и количества циклов деформирования деталей в условиях их работы при блочном режиме нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Collins J.A. Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention.– New York: John Wiley & Sons, 1981. – 630 p.
2. Сызранцев В.Н., Сызранцева К.В. Обработка данных многоцикловых испытаний на основе кинетической теории усталости и методов непараметрической статистики. – Тюмень, ТюмГНГУ, 2015. – 135 с.
3. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. – М.: Высш. шк., 1991. – 319 с.
4. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
5. Даль В. Поведение стали при циклических нагрузках. – М.: Металлургия, 1982. – 568 с.
6. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: справочное пособие / В.С. Касаткин, А.Б. Кудрин, Л.М. Лобанов и др. – Киев: Наукова Думка, 1981. – 584 с.
7. Бойко В.И. О выборе материала, конструкции и технологии изготовления датчика усталостного повреждения // Заводская лаборатория. – 1981. – № 1. – С. 79–82.
8. Harting D.R. The S/N-Fatigue-life Gage: a Direct Means of Measuring Cumulative Fatigue Damage // Experimental Mechanics. – 1966. – V. 6. – № 2. – P. 19A–24A.
9. Okubo H. Determination of the surface stress by means of electroplating // J. Appl. Phys. – 1953. – V. 24. – Iss. 9. – P. 1130–1133.
10. Maruyama K. Stress Analysis of a Bolt-Nut Joint by the Finite Element Method and the Copper-Electroplating Technique // Bulletin of the JSME. – 1974. – V. 17. – P. 442–450.
11. Imamura Y., Sato S. Dynamic Stress Distribution in the Helical Gear Measured by the Copper Electroplating Method // Bulletin of the JSME. – 1978. – V. 21. – № 156. – P. 1038–1046.
12. Kitaoka S., Nagase Ya. Experimental Evaluation of Stress Intensity Factor Using the Phenomena of Grain Growth and Slip-initiation in Copper Foil // Bulletin of JSME. – 1984. – V. 27. – № 233. – P. 2353–2359.
13. Kitaoka S., Nagase Ya., Seika M. Stress Measurement Using Slip-initiation Phenomenon in Iron Foil // Bulletin of the JSME. – 1981. – V. 24. – № 197. – P. 1901–1908.
14. Сызранцев В.Н., Голофаст С.Л. Измерение циклических деформаций и прогнозирование долговечности деталей по показаниям датчиков деформаций интегрального типа. – Новосибирск: Наука, 2004. – 206 с.
15. Examination of the Adaptability of the Copper Electroplating Method of Stress Analysis to the Low Temperature Range / M. Seika et al. // Bulletin of the JSME. – 1974. – V. 17. – № 107. – P. 544–551.
16. Seika M., Kitaoka S. A Study on the Improvement in Sensitivity of Strain Gauges Made of Copper Electrodeposited Foil // Bulletin of the JSME. – 1984. – V. 27. – № 234. – P. 2664–2669.
17. Сызранцев В.Н., Голофаст С.Л., Сызранцева К.В. Диагностика нагруженности и ресурса деталей трансмиссий и несущих систем машин по показаниям датчиков деформаций интегрального типа. – Новосибирск: Наука, 2004. – 188 с.
18. Ono Y., Kitaoka S. Cyclic stress measurement method using grain size and occurrence rate of grown grains in electrodeposited copper foil // Strain. – 2011. – V. 47. – Iss. 2. – P. 154–161.
19. Ono Y., Morito S. Effect of ambient temperature on stress measurement method using copper foil // Strain. – 2014. – V. 50. – Iss. 4. – P. 292–300.
20. Голофаст С.Л. Диагностика работоспособности передач Новикова датчиками деформаций интегрального типа / под ред. В.Н. Сызранцева. – Новосибирск: Наука, 2004. – 164 с.
21. Fatigue gage utilizing surface roughening of aluminum foil / Y. Nagase, Y. Sawaki, F. Moritake, H. Yoshida // J. Eng. Mater. Tech. – 1995. – V. 117. – P. 55–61.
22. Nagase Yasuo, Nakamura Yoshiyuki. Fatigue gauge utilizing slip deformation of aluminum foil // JSME Int. J., Series 1. – 1992. – V. 35. – P. 247–252.
23. Nagase Y., Nakamura Y. Fatigue Gauge Utilizing Slip Deformation of Aluminum Foil // Trans. Japan Soc. of Mech. Eng. Series A. – 1991. – V. 57. – P. 1313–1319.

24. Nagase Ya., Nakamura T., Nakamura Yo. Fatigue Gauge Utilizing Slip Deformation of Aluminum Foil (Slip Initiation and Surface Roughening Phenomena under Uniaxial Stressing) // JSME International Journal. S. I. – 1990. – V. 33. – № 4. – P. 506–513.
25. Змызгова Т.Р. Новый метод фильтрации изображений реакции датчиков деформаций // Технологии техносферной безопасности. – 2012. – № 4 (44). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2012-4/16-04-12.ttb.pdf> (дата обращения 16.05.2017).
26. Змызгова Т.Р. Особенности бинаризации полутоновых изображений реакции датчиков деформаций // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – № 2 (54). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-2/01-02-14.ttb.pdf> (дата обращения 6.05.2017).
27. Syzrantsev V., Syzrantseva K. The stress-strain condition estimation of detail in crack tip by integral strain gauges // IOP Conf. Series: Mat. Sc. and Eng. – 2016. – V. 127. – Article Number 012051.
28. Syzrantseva K.V., Syzrantsev V.N., Dvoynikov M.V. Application of finite element analysis at development of Integral Strain Gauges calibration method for research of welded construction // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V. 177. – Article Number 012133. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012133.
29. Тютрин С.Г. Усталостный датчик из индиевой фольги // Вестник машиностроения. – 2012. – № 11. – С. 82–83.
30. Усталостный датчик из оловянной фольги / С.Г. Тютрин, И.И. Манило, А.А. Городских, С.В. Герасимов // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – № 9. – С. 52–54.
31. Марголин А.М., Кузяков О.Н. Автоматизация процесса измерения усталостных повреждений и оценки остаточного ресурса конструкций // Электронные средства и системы управления. – 2007. – № 2. – С. 65–67.
32. Копнов В.А., Котельников А.П. Прогнозирование ресурса металлоконструкций транспортных машин датчиками деформаций интегрального типа // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2009. – № 3. – С. 76–82.
33. Москвин П.В. Диагностика и прогнозирование остаточного ресурса сварных металлоконструкций мостовых кранов с использованием металлических пленок // Дефектоскопия. – 2007. – № 12. – С. 86–98.
34. Применение датчиков деформации интегрального типа для оценки усталостной поврежденности углеродных композитов / С.В. Панин, М.В. Бурков, П.С. Любутин, Ю.А. Алтухов, С.А. Хижняк // Дефектоскопия. – 2014. – № 5. – С. 47–59.
35. Investigation of various criteria for evaluation of aluminum thin foil «smart sensors» images / S.V. Panin, A.V. Eremin, P.S. Lyubutin, M.V. Burkov // IOP Conf. Series: Mat. Sc. and Eng. – 2014. – V. 66. – Article Number 012024.
36. Investigation of «smart sensor's» behavior during cyclic test of carbon fiber reinforce polymer / M.V. Burkov et al. // Proc. Int. Conf. Mech. Eng., Automation and Control Systems (MEACS). – Tomsk: IEEE, 2014. – P. 448–453.
37. Investigation of Sensitivity of Aluminum Foil Based Strain Sensors at Fatigue Damage Evaluation of CFRP / M.V. Burkov, S.V. Panin, P.S. Lyubutin, A.V. Eremin // Adv. Mater. Res. – 2014. – V. 1040. – P. 943–948.
38. An approach for structural health monitoring of CFRP using aluminum foil sensors / M. Burkov, S. Panin, P. Lyubutin, A. Eremin // 11th Europ. Conf. on Non-Destructive Testing. – Prague, 2014. – Article Number 16703.
39. Aluminum foil based fatigue sensor for structural health monitoring of carbon fiber composites / M. Burkov, S. Panin, P. Lyubutin, A. Eremin, P. Maruschak, A. Menou // Procedia Technology. – 2015. – V. 19. – P. 307–312.
40. Способ изготовления датчиков для контроля циклических деформаций: пат. Рос. Федерация № 2209412; заявл. 11.03.2001, опубл. 27.07.2003. – Бюл. № 21. – 4 с.
41. Почтенный Е.К. Прогнозирование долговечности и диагностика усталости машин. – Минск: Наука и техника, 1983. – 246 с.
42. Почтенный Е.К. Оценка циклической прочности деталей машин // Вестник машиностроения – 1969. – № 9. – С. 11–15.

Поступила 18.08.2017 г.

Информация об авторах

Сызранцев В.Н., доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности Тюменского индустриального университета.

Сызранцева К.В., доцент кафедры кибернетических систем Тюменского индустриального университета.

UDC 621.01/.03

DETERMINATION OF STRESSES AND RESIDUAL LIFE IN ACCORDANCE WITH INDICATIONS OF VARIABLE-SENSITIVITY INTEGRAL STRAIN GAUGE

Vladimir N. Syzrantsev¹,

v_syzrantsev@mail.ru

Ksenia V. Syzrantseva¹,

¹ Industrial University of Tyumen,
38, Volodarskogo street, Tyumen, 625000, Russia.

The relevance. The urgent problems of any stage of mechanical engineering development are the reduction of time for design and mastering the production of new items of machines, and the increase in their reliability and life-time. The period for the item follow-on can be shortened by experimental methods that allow determining the character of cyclic stresses (strains) distribution along the investigated part surfaces, estimating their serviceability and fatigue strength at the initial stages of testing. The opportunities of experimental methods are essentially expanded when the level of cyclic stresses is assessed by means of integral strain gauges made of a foil having certain characteristics. The long-term experience of applying the integral strain gauges indicate that they can be used to establish a wide range of problems on determining the character of surface stress variation for parts and load-carrying elements of machines, recovery of the stress distribution law, determination of equivalent stresses, assessment of location and terms of probable fractures of items within the stand and operation tests of machines. At the same time, implementation of the developed techniques for integral strain gauges applying during operation of the items revealed a number of problems related to both monitoring the integral strain gauges-reaction and uncertainty of the testing time because of the incubation period of the gauge prior to appearance of its reaction. The important problem of forecasting the life-time of parts, metallic structures of machines, oil and gas pipes that are subjected to a random spectrum of cyclic strain is the assessment of the accumulated fatigue damages of the metal. This problem solution demands the development of models that relate the reaction on the integral strain gauges to the level of damages occurred in operation of the gauged item.

The aim of the study is to develop the variable-sensitivity integral strain gauge that is characterized by a variable sensitivity to the amplitude of cyclic loads without the incubation period. This gauge allows simplifying considerably the registration of variable-sensitivity integral strain gauge reaction at any moment of the item testing; to develop the techniques for solving the problems of forecasting the life-time of machine parts and oil and gas pipe elements, that is the technique for stress measurement, the analysis of equivalent stresses and equivalent numbers of loading cycles in accordance with the damaging effect.

The methods used in the study: the kinetic theory of mechanical fatigue, numerical methods for solving the transcendental equations, the strength of materials.

The results. The paper considers the technique for producing variable-sensitivity integral strain gauge. The authors have determined the variation of accumulated damages (obtained within the preliminary operating time of the gauge) for the operating part of the gauge without reaction based on the kinetic theory of mechanical fatigue. The problems of stress determination and forecasting the median number of cycles prior to fracture of the item based on variable-sensitivity integral strain gauge indications were solved. For operating conditions of the item at the block mode of loading the reaction of variable-sensitivity integral strain gauge was used to determine the equivalent stress according to the damaging effect and the equivalent strain according to the damaging effect of the numbers of cycles.

Key words:

Integral strain gauges, variable sensitivity, kinetic theory of mechanical fatigue, cyclic stresses, fatigue damages, equivalent stresses, durability.

REFERENCES

1. Collins J.A. *Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention*. New York, John Wiley & Sons, 1981. 630 p.
2. Syzrantsev V.N. *Obrabotka dannykh mnogotsiklovnykh ispytaniy na osnove kineticheskoy teorii ustalosti i metodov neparametricheskoy statistiki* [Data processing of high-cyclic fatigue test based on the kinetic theory of fatigue and methods of nonparametric statistics]. Tyumen, TSOGU Publ., 2015. 135 p.
3. Kogaev V.P., Drozdov Yu.N. *Prochnost i iznosostoykost detaley mashin* [Strength and durability of machine parts]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991. 319 p.
4. Bolotin V.V. *Prognozirovanie resursa mashin i konstruktivnykh* [Forecasting the resource of machines and structures]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1984. 312 p.
5. Dal V. *Povedenie stali pri tsiklicheskikh nagruzkakh* [Steel behavior under cyclic loads]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 568 p.
6. Kasatkin B.S., Kudrin A.B., Lobanov L.M. *Ekspperimentalnye metody issledovaniy deformatsiy i napryazheniy* [Experimental methods for studying deformations and stresses]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1981. 584 p.
7. Boyko V.I. *O vybore materiala, konstruktivnykh i tekhnologii izgotovleniya datchika ustalostnogo povrezhdeniya* [On the choice of material, design and manufacturing techniques of the gauge of a fatigue damage]. *Industrial laboratory. Materials diagnostics*, 1981, no. 1, pp. 79–82.
8. Harting D.R. The S/N-Fatigue-life Gage: a Direct Means of Measuring Cumulative Fatigue Damage. *Experimental Mechanics*, 1966, vol. 6, no. 2, pp. 19A–24A.
9. Okubo H. Determination of the surface stress by means of electroplating. *J. Appl. Phys.*, 1953, vol. 24, Iss. 9, pp. 1130–1133.
10. Maruyama K. Stress Analysis of a Bolt-Nut Joint by the Finite Element Method and the Copper-Electroplating Technique. *Bulletin of the JSME*, 1974, vol. 17, pp. 442–450.
11. Imamura Y., Sato S. Dynamic Stress Distribution in the Helical Gear Measured by the Copper Electroplating Method. *Bulletin of the JSME*, 1978, vol. 21, no. 156, pp. 1038–1046.
12. Kitaoka S., Nagase Ya. Experimental Evaluation of Stress Intensity Factor Using the Phenomena of Grain Growth and Slip-initi-

- ation in Copper Foil. *Bulletin of JSME*, 1984, vol. 27, no. 233, pp. 2353–2359.
13. Kitaoka S., Nagase Ya., Seika M. Stress Measurement Using Slip-initiation Phenomenon in Iron Foil. *Bulletin of the JSME*, 1981, vol. 24, no. 197, pp. 1901–1908.
 14. Syzrantsev V.N., Golofast S.L. *Izmerenie tsiklicheskih deformatsiy i prognozirovanie dolgovechnosti detaley po pokazaniyam datchikov deformatsiy integralnogo tipa* [Cyclic strain measurement and machine parts longevity forecasting according to integral strain gauges indications]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2004. 206 p.
 15. Seika M. Examination of the Adaptability of the Copper Electroplating Method of Stress Analysis to the Low Temperature Range. *Bulletin of the JSME*, 1974, vol. 17, no. 107, pp. 544–551.
 16. Seika M., Kitaoka S. A Study on the Improvement in Sensitivity of Strain Gauges Made of Copper Electrodeposited Foil. *Bulletin of the JSME*, 1984, vol. 27, no. 234, pp. 2664–2669.
 17. Syzrantsev V.N., Golofast S.L., Syzrantseva K.V. *Diagnostika nagruzhennosti i resursa detaley transmissiy i nesushchikh sistem mashin po pokazaniyam datchikov deformatsiy integralnogo tipa* [Diagnostics of loading and resource of parts of machines transmissions and carrying systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2004. 188 p.
 18. Ono Y., Kitaoka S. Cyclic stress measurement method using grain size and occurrence rate of grown grains in electrodeposited copper foil. *Strain*, 2011, vol. 47, Iss. 2, pp. 154–161.
 19. Ono Y., Morito S. Effect of ambient temperature on stress measurement method using copper foil. *Strain*, 2014, vol. 50, Iss. 4, pp. 292–300.
 20. Golofast S.L. *Diagnostika rabotosposobnosti peredach Novikova datchikami deformatsiy integralnogo tipa* [Serviceability diagnostics of Wildhaber–Novikov gears by integral strain gauges]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2004. 164 p.
 21. Nagase Y., Sawaki Y., Moritake F., Yoshida H. Fatigue gage utilizing surface roughening of aluminum foil. *J. Eng. Mater. Tech*, 1995, vol. 117, pp. 55–61.
 22. Nagase Yasuo, Nakamura Yoshiyuki. Fatigue gauge utilizing slip deformation of aluminum foil. *JSME Int. J., Series 1*, 1992, vol. 35, pp. 247–252.
 23. Nagase Y., Nakamura Y. Fatigue Gauge Utilizing Slip Deformation of Aluminum Foil. *Trans. Japan Soc. of Mech. Eng. Series A*, 1991, vol. 57, pp. 1313–1319.
 24. Nagase Ya., Nakamura T., Nakamura Yo. Fatigue Gauge Utilizing Slip Deformation of Aluminum Foil (Slip Initiation and Surface Roughening Phenomena under Uniaxial Stressing). *JSME International Journal. S.I.*, 1990, vol. 33, no. 4, pp. 506–513.
 25. Zmysgova T.R. The new method of the filtration of image of reactions of gauge's indications. *Technologies of technospheric safety*, 2012, vol.4. In Rus. Available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2012-4/16-04-12.ttb.pdf> (accessed 16 May 2017).
 26. Zmysgova T.R. The binarization's features of grayscale images of reaction of strain gauges. *Technologies of technospheric safety*, 2014, vol.2. In Rus. Available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-2/01-02-14.ttb.pdf> (accessed 6 May 2017).
 27. Syzrantsev V., Syzrantseva K. The stress-strain condition estimation of detail in crack tip by integral strain gauges. *IOP Conf. Series: Mat. Sc. and Eng*, 2016, vol. 127, Article Number 012051.
 28. Syzrantseva K.V., Syzrantsev V.N., Dvoynikov M.V. Application of finite element analysis at development of Integral Strain Gauges calibration method for research of welded construction. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 177, Article Number 012133. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012133.
 29. Tyutrin S.G. Indium leaf fatigue sensor. *Russian engineering search*, 2012, no. 11, pp. 82–83. In Rus.
 30. Tyutrin S.G., Manilo I.I., Gorodskikh A.A., Gerasimov S.V. Tin Foil Fatigue Sensor. *Tractors and agricultural machinery*, 2013, no. 9, pp. 52–54. In Rus.
 31. Margolin A.M., Kuzyakov O.N. *Avtomatizatsiya protsessa izmereniya ustalostnykh povrezhdeniy i otsenki ostatochnogo resursa konstruksiy* [Automation of the process of measuring fatigue damages and estimating the remaining life of structures]. *Electronic means and control systems*, 2007, no. 2, pp. 65–67.
 32. Kopnov V.A., Kotelnikov A.P. Forecasting metal structure resource on transport machines by stress sensors of integral type. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2009, no. 3, pp. 76–82. In Rus.
 33. Moskvina P.V. Diagnosing and forecasting the residual service life of welded metal structures of bridge cranes using metal foils. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2007, vol. 43, no. 12, pp. 842–852. In Rus.
 34. Panin S.V., Burkov M.V., Lyubutin P.S., Altukhov Y.A., Khizhnyak S.A. Application of integral-type deformation pickups for evaluating the fatigue damage of carbon composites. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, no. 5, pp. 288–298. In Rus.
 35. Panin S.V., Eremin A.V., Lyubutin P.S., Burkov M.V. Investigation of various criteria for evaluation of aluminum thin foil «smart sensors» images. *IOP Conf. Series: Mat. Sc. and Eng*, 2014, vol. 66, Article Number 012024.
 36. Burkov M.V. Investigation of «smart sensor's» behavior during cyclic test of carbon fiber reinforce polymer. *Proc. Int. Conf. Mech. Eng., Automation and Control Systems (MEACS)*. Tomsk, IEEE, 2014. pp. 448–453.
 37. Burkov M.V., Panin S.V., Lyubutin P.S., Eremin A.V. Investigation of Sensitivity of Aluminum Foil Based Strain Sensors at Fatigue Damage Evaluation of CFRP. *Adv. Mater. Res*, 2014, vol. 1040, pp. 943–948.
 38. Burkov M., Panin S., Lyubutin P., Eremin A. An approach for structural health monitoring of CFRP using aluminum foil sensors. *11th Europ. Conf. on Non-Destructive Testing*. Prague, 2014. Article Number 16703.
 39. Burkov M., Panin S., Lyubutin P., Eremin A., Maruschak P., Menou A. Aluminum foil based fatigue sensor for structural health monitoring of carbon fiber composites. *Procedia Technology*, 2015, vol. 19, pp. 307–312.
 40. Syzrantsev V.N. Sposob izgotovleniya datchikov dlya kontrolya tsiklicheskih deformatsiy [Method for manufacturing sensors to monitor cyclic deformations]. Patent RF, no. 2209412, 2003.
 41. Pochtenny E.K. *Prognozirovanie dolgovechnosti i diagnostika ustalosti mashin* [Longevity forecasting and fatigue diagnostics of machines]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1983. 246 p.
 42. Pochtenny E.K. *Otsenka tsiklicheskoy prochnosti detaley mashin* [Estimation of cyclic durability of machine parts]. *Russian Engineering Research*, 1969, no. 9, p. 11–15.

Received: 18 August 2017.

Information about the authors

Vladimir N. Syzrantsev, Dr. Sc., professor, Honorary Scientist of the Russian Federation, head of the department, Industrial University of Tyumen.

Ksenia V. Syzrantseva, Cand. Sc., associate professor, Industrial University of Tyumen.

УДК 622.24

ПОЛУЧЕНИЕ БУРОВЫХ РЕАГЕНТОВ МОДИФИКАЦИЕЙ НЕЙТРАЛЬНО-СУЛЬФИТНЫХ ЩЕЛОКОВ ФОСФОНОВЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

Тептерева Галина Алексеевна¹,
teptereva.tga@yandex.ru

Конесев Геннадий Васильевич¹,
Konecev burenie@mail.ru

Исмаков Рустэм Адипович¹,
Ismakovrustem@gmail.ru

Кантор Евгений Абрамович¹,
evgkantor@mail.ru

Дихтярь Татьяна Дмитриевна²,
dihttd@gmail.com

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450000, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

² Филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском,
Россия, 452620, г. Октябрьский, ул. Девонская, 54.

Актуальность работы обусловлена задачей создания низкотоксичных, биоразлагаемых и недорогих реагентов для химической обработки буровых промывочных жидкостей на водной основе. В связи с этим рассматриваются способы повышения реакционной способности нейтрально-сульфитных щелоков, используемых в качестве основы таких реагентов.

Цель работы: исследование возможности применения фосфоновых соединений при получении реагентов на основе нейтрально-сульфитных щелоков для обработки буровых промывочных жидкостей с целью улучшения их технологических параметров

Методы исследования: инструментальные методы определения параметров буровых растворов по РД 39–00147001–773–2004 (где ρ – плотность; UV – условная вязкость; $\eta_{пл}$ – пластическая вязкость; τ_0 – динамическое напряжение сдвига; $СНС$ – статическое напряжение сдвига; $ПФ$ – показатель фильтрации; pH – показатель содержания ионов водорода) с добавками нейтрально-сульфитных щелоков, фосфоновых соединений в составе нитрилметилефосфоновой кислоты, триполифосфата натрия как при отдельном, так и совместном их вводе в состав буровых промывочных жидкостей.

Результаты. Установлено, что вовлечение фосфоновых соединений в состав реагентов на основе нейтрально-сульфитного щелока позволяет улучшать качественные характеристики технологических промывочных жидкостей, способствуя устойчивости параметров буровой системы к воздействию повышенных забойных температур и минеральной агрессии, обеспечивая высокую разжижающую способность и снижая показатель фильтрации бурового раствора. Указанные свойства буровых реагентов, модифицированных фосфоновыми соединениями, позволяют перевести низкорекреационные нейтральные щелока, используемые в качестве основы, в состав перспективного ресурсовозобновляемого отечественного сырья.

Вывод. Исследование физико-химических свойств и особенностей щелоков нейтрально-сульфитной варки показало, что они, несмотря на сниженную реакционную способность, являются весьма перспективным компонентом для получения реагентов, особенно в условиях повышенного спроса на возобновляемые сырьевые источники.

Ключевые слова:

Нейтрально-сульфитный щелок, лигносульфонат, фосфоновые соединения, делигнификация, комплексные соединения, буровые промывочные жидкости, условная вязкость, показатель фильтрации.

Введение

Феррохромлигносульфонатный реагент (ФХЛС), получаемый путем обработки лигносульфонатов серноокислым железом и бихроматом натрия, используется для снижения вязкости и частично фильтрации буровых промывочных жидкостей на водной основе [1, 2 и др.]. Реагент ФХЛС характеризуется повышенной устойчивостью к термической и минеральной агрессии. Однако в его составе присутствуют высокотоксичные соединения хрома в высшей степени окисления (шестивалентный хром). К тому же реагент проявляет пенообразующую способность в вязкокопластичных технологических жидкостях, например в глинистых растворах [1, 3–6].

Современные феррохромлигносульфонатные реагенты выпускаются с уменьшенным содержанием соединений хрома, а проблемы, связанные с экологией и повышенным пенообразованием, частично снимаются введением специальных реагентов [7–10 и др.].

Все отмеченное выше характерно для буровых реагентов, основой которых являются лигносульфонаты кислых сульфитных варок.

При сульфитных методах варки древесное сырье обрабатывают сульфитными варочными растворами – водными растворами сернистой кислоты и ее солей в широком интервале pH 1–13 и температур 125–180 °С в течение 1–7 ч.

В этом случае буровой реагент получают путем модификации лигносульфоната катионами поливалентных металлов. В результате образуется комплексное водорастворимое соединение – катионами-комплексобразователями являются трехвалентные железо и хром, как результат окисления двухвалентного железа и восстановления шестивалентного хрома [1, 11]. Полученный продукт имеет весьма приемлемые свойства реагента-понижителя фильтрации и вязкости буровых промышленных жидкостей.

Однако повышение требований к безопасности реагентов ставит задачи создания низкотоксичных, биоразлагаемых [12] и недорогих реагентов для химической обработки буровых растворов. Кроме того, в связи с интенсификацией целлюлозно-бумажного производства с целью повышения выхода целлюлозы, существенно снижено содержание основного вещества щелоков – лигносульфоната, и, как следствие, уменьшено содержание фенольных гидроксильных групп в составе фенилпропанового звена, отвечающих за разжижающую способность получаемого бурового реагента и его устойчивость к воздействию высоких забойных температур и минерализованной дисперсионной среды (солевой агрессии).

К тому же при высоком уровне выхода целлюлозы делигнификация древесного сырья проводится в других технологических условиях: рН 6–9 и наличие в варочном растворе сульфитов, гидросульфитов и катионов натрия или аммония в качестве основания варки. Очевидно, способ делигнификации трансформируется из сульфитного в нейтрально-сульфитный, основной реакцией которого является сульфирование. Процесс проводится под давлением при температуре от 135 до 150 °С в течение 4–12 часов, получаемые лигносульфонаты нейтрально-сульфитного щелока имеют сравнительно невысокую молекулярную массу 4350–7500 г/моль (на порядок меньше, чем при кислых сульфитных варках) [1, 13].

Нейтрально-сульфитные лигносульфонаты являются сравнительно малоизученным сырьевым компонентом основы для получения буровых реагентов. В этой связи исследования структуры и свойств нейтрально-сульфитных щелоков и лигносульфоната в качестве ресурсозобновляемого и недорогого отечественного сырья становится весьма актуальным.

Сравнительная характеристика щелоков сульфитного и нейтрально-сульфитного способов получения приведена в табл. 1. (органическая составляющая представлена лигносульфонатами, пентозами, лигнином, серой органической).

Видно, что нейтрально-сульфитный щелок (НСЩ) характеризуется меньшим содержанием основного вещества – лигносульфоната: 35,6 г/дм³, (45 %), в отличие от 55 % в щелоках сульфитной варки. К тому же НСЩ содержит значительное количество не растворившегося лигнина, полностью отсутствующего в щелоке сульфитной варки. Зола

составляет до 42,81 %, минеральные вещества щелока представлены сульфитами и гидросульфитами, возможно, и продуктом их разложения – полисульфатами. Обнаружены следы тиосульфата и сульфата. Сера при нейтрально-сульфитной варке обычно связана с органическими соединениями.

Таблица 1. Характеристика покомпонентного состава щелоков
Table 1. Characteristics of the liquor component composition

Показатель/Indicator	Содержание продуктов Product content		
	нейтрально-сульфитный щелок neutral-sulphite lye		сульфитный щелок sulphite lye
	г/дм ³ g/dm ³	% в пересчете на сухое вещество % in terms of dry matter	
Сухие вещества Dry substances	71,87	100	100
Органические вещества Organic matter	43,39	60,37	79,57
Лигносульфонаты Lignosulfonates	35,63	45,58	55,00
Зола/Ash	30,77	42,81	20,00
Сульфатная зола Sulphated ash	39,29	54,67	–
Редуцирующие вещества Reducing substances: до инверсии/before inversion после инверсии/after inversion	5,29 12,55	7,36 17,46	– 28
Пентозы (после инверсии) Pentosis (after inversion)	7,76	10,79	20,6
Лигнин/Lignin	12,76	17,75	–
Сера в органических соединениях Sulfur in organic compounds	1,85	2,58	–
Летучие кислоты в пересчете на уксусную кислоту Volatile acids in terms of acetic acid	6,64	9,21	3,15
Na ₂ SO ₃	1,2	1,42	2,06
Na ₂ SO ₄	15,07	20,97	2,7
Na ₂ CO ₃	3,63	5,05	1,2
CH ₃ COONa	9,77	12,18	–

Все указанные примеси, в совокупности, и создают ряд проблем по направлению использования нейтрально-сульфитного щелока в производстве буровых реагентов. К тому же, если при сульфитной варке древесины около 90 мас. % лигнина становится водорастворимым, то при нейтрально-сульфитной растворимым становится только 20–30 % лигнина [14].

Лигносульфонат сульфитных варок, используемый в течение десятков лет как основа для получения буровых реагентов, значительно изменил свои физико-химические свойства с переходом большинства перерабатывающих предприятий на нейтральные способы делигнификации древесины, буровые реагенты ухудшили свои качественные характеристики: снизилась способность

к разжижению и регулированию показателя фильтрации, а также формированию устойчивых структурно-механических свойств систем буровых промывочных жидкостей. В связи со снижением доли хвойной и широколиственной древесины в составе перерабатываемого сырья, ужесточением экологических требований к технологическому процессу делигнификации древесины [13, 15, 16] и снижением содержания массовой доли лигносульфоната в получаемых щелоках возникла необходимость в новом подходе к модификации лигносульфонатов при производстве буровых реагентов.

В целом эти и другие факторы привели к изменению свойств буровых реагентов, получаемых на основе нейтрально-сульфитного щелока, которые весьма ухудшились по сравнению с реагентами сульфитной технологии (табл. 2).

Исследования реагентов на основе нейтрально-сульфитного лигносульфоната

Для исследования реагентов на основе нейтрально-сульфитного лигносульфоната в качестве основы использован глинистый раствор, приготовленный из Серпуховского глинопорошка марки ПБМВ. Термообработка реакционной смеси при температуре 40 °С проводилась в течение 3 часов. Показатели свойств глинистого раствора определялись по РД 39-00147001-773-2004 (табл. 2).

Анализ табл. 2 показал, что при температуре 20 °С 0,5 мас. % нейтрально-сульфитного лигносульфоната в глинистом растворе снижает условную вязкость на 19 % (с 64 до 52 с), не оказывая влияния на показатель фильтрации. ФХЛС, полученный на нейтрально-сульфитном лигносульфо-

нате, снижает условную вязкость на 49 %, в то время как ФХЛС на основе сульфитного лигносульфоната – на 57 %. Показатель фильтрации снижается на 22 и 44 % соответственно. Воздействие высоких температур ухудшает свойства нейтрально-сульфитного щелока. Реагент ФХЛС, полученный на основе нейтрально-сульфитного щелока, загущает глинистый раствор до условной вязкости 125 с, в то время как ФХЛС, получаемый на сульфитном лигносульфонате загущает глинистый раствор до 76 с (на 40 % меньше). Условная вязкость при использовании зарубежного реагента BORRE-THIN (аналога ФХЛС) при T=150 °С практически не изменилась.

Исследование реагентов, содержащих фосфоновые группы

Приведены результаты исследований по устранению указанных недостатков изменением технологии производства бурового реагента на основе нейтрально-сульфитного щелока и способов его модифицирования. Обоснована возможность использования комплексобразующей способности фосфоновых групп ($\text{CH}_2\text{PO}_3\text{H}_2$).

Как известно, фосфоновые группы имеют несколько протонированных форм: PO_3^{2-} ; PO_3H^- ; PO_3H_2 , которые, являясь по отношению к карбоксильным группам (COO^-) более активными нуклеофильными реагентами, способствуют высвобождению карбоксильных групп и выходу анионов в раствор в соответствии с рядом нуклеофильной активности: $\text{COO}^- < \text{OH}^- < \text{SO}_3\text{H}^- < \text{SO}_3^{2-} < \text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ [1, 13, 14, 17, 18].

Роль фосфоновых групп исследована на примере нитро-триметилфосфоновой кислоты (НТФ)

Таблица 2. Сравнительная характеристика реагента ФХЛС, получаемого на основе сульфитных и нейтрально-сульфитных щелоков

Table 2. Comparative characteristics of the ferrochromolignosulfonat (FCLS) reagent derived from the sulfite and neutral sulfite liquors

Состав Composition	Параметры раствора/Solution parameters							
	ρ , кг/м ³ ρ , kg/m ³	УВ, с UV, s	$\eta_{\text{пл}}$, мПа·с $\eta_{\text{пл}}$, mPa·s	τ_0 , дПа τ_0 , dPa	СНС, дПа SNS, dPa		ПФ, см ³ /30 мин PF, cm ³ /30 min	рН
					1	10		
Температура/Temperature T=20 °С								
№ 1 Исходный глинистый раствор/No. 1 Initial clay mud	1080	64	16	68	50	64	18	9,0
№ 1+0,5 % ЛСТ нейтрально-сульфитного No. 1+0,5 % LST of neutral sulphite	1080	52	9	81	48	81	18	9,1
№ 1+0,5 % ФХЛС на нейтрально-сульфитном ЛСТ No. 1+0,5 % FCLS on a neutral sulphite LST	1080	32	6	37	9	13	14	8,8
№ 1+0,5 % ФХЛС на сульфитном ЛСТ No. 1+0,5 % FCLS on sulphite LST	1070	28	17	23	9	13	10	8,9
Термостатирование при T=150 °С, 3 часа Thermostatting at T=150 °С, 3 hours								
№ 1+0,5 % ЛСТ нейтрально-сульфитного No. 1+0,5 % LST of neutral sulphite	1080	не течет does not flow		–				
№ 1+1 % ФХЛС на нейтрально-сульфитном ЛСТ No. 1+1 % FCLS on a neutral sulphite LST	1080	125	16	45	95	138	16,0	8,0
№ 1+0,5 % ФХЛС на сульфитном ЛСТ No. 1+0,5 % FCLS on sulphite LST	1080	76	27	53	26	33	18	8,9

и триполифосфата натрия (ТПФ). Выявлено резкое повышение ЭДС реакции (до +0,989 В для нейтральных и +0,890 В для сульфитных щелоков). Испытания проводились в электрохимической ячейке со стеклянным индикаторным и хлоридсеребряным электродом сравнения для растворов сульфитных щелоков концентрации $C=2,5 \cdot 10^{-4}$ М.

Указанное свидетельствует о том, что взаимодействие фосфоновых соединений с матрицей лигносульфоната термодинамически выгодно.

При модификации фенилпропановой группировки лигносульфоната появляются карбоксильные группы (изначально отсутствующие в сульфитных щелоках), увеличивается число сульфогрупп, ОН-фенольных и пирокатехиновых групп за счет возможной трансформации метоксильных групп в бензольном ядре [19]. Карбоксильные группы в составе фенилпропановой группировки замещаются на фосфоновые с образованием комплексных соединений. Таким образом, в составе фенилпропановой группировки сульфитных щелоков возможно образование комплексных соединений как минимум двух видов: за счет создания координационных связей катиона – электрофила с фенилпропановыми группировками, и за счет замены аниона-нуклеофила (для реагентов с добавкой НТФ или ТПФ – карбоксильной группы) на фосфоновую группу [14, 18, 20].

Фосфоновые соединения в составе НТФ и ТПФ исследованы как при их отдельном, так и при совместном (реагент ФХЛС-2М) вводе в исходный глинистый раствор. Параметры исходного и обработанного ФХЛМ-2М глинистого раствора представлены в табл. 3.

Показано, что вовлечение 0,5 % НТФ в состав глинистого раствора снижает его условную вязкость (УВ) на 64 %, а ТПФ – на 65 %, в то время как нейтрально-сульфитный лигносульфонат сни-

жает УВ глинистого раствора только на 18 % (с 64 до 52 с). Указанное свидетельствует об эффективности ввода фосфоновых соединений в состав глинистого раствора. При этом столь незначительное введение НТФ, как и ТПФ, не оказывает заметного влияния на рН реакционной смеси, как при совместном, так и раздельном использовании.

На величину показателя фильтрации значительно большее влияние оказывает ТПФ, снижая ПФ до $8 \text{ см}^3/30 \text{ мин}$, в отличие от НТФ – $22 \text{ см}^3/30 \text{ мин}$ и нейтрально-сульфитного щелока – $18 \text{ см}^3/30 \text{ мин}$. Совместный ввод фосфоновых соединений (реагент ФХЛС-2М) дает высокий синергетический эффект, снижая УВ до 25 с при 20°C и до 26 с при 150°C , т. е. на 60 и 61 % соответственно по отношению к исходному глинистому раствору, для которого УВ равна 64 с.

Результаты исследования свойств глинистого раствора с 1 % добавками ФХЛС+НТФ и ФХЛС+ТПФ приведены в табл. 4.

Данные табл. 4 показывают, что полученные на основе нейтрально-сульфитных щелоков с использованием НТФ и ТПФ буровые реагенты превосходят по качественным характеристикам промышленный феррохромлигносульфонатный реагент ФХЛС, полученный на сульфитном щелоке.

Выводы и рекомендации

Установлено, что полученные с использованием НТФ и ТПФ комплексные соединения (буровые реагенты на основе нейтрально-сульфитных щелоков) обладают ярко выраженными свойствами реагентов-понижителей вязкости и фильтрации, проявляют устойчивость параметров в широком интервале температур, вплоть до $150\text{--}190^\circ\text{C}$, не имеют таких недостатков, как образование устойчивой пены и высокое содержание соединений токсичного шестивалентного хрома (снижено до 0,56 %).

Таблица 3. Параметры глинистого раствора с добавками нейтрально-сульфитного лигносульфоната и реагентов, содержащих фосфоновые группы. Время термообработки 3 часа

Table 3. Parameters of clay mud with addition of neutral sulfite lignosulfonate and reagents containing phosphonic groups. Cooking time is 3 hours

Состав/Composition	Параметры раствора/Solution parameters							
	ρ , кг/м ³ ρ , kg/m ³	УВ, с UV, s	$\eta_{\text{пл}}$, МПа·с η_{pl} , mPa·s	τ_0 , дПа τ_0 , dPa	СНС, дПа SNS, dPa		ПФ, см ³ /30 мин PF, cm ³ /30 min	рН
					1	10		
Температура/Temperature T=20 °C								
№ 1 Исходный глинистый раствор/No. 1 Initial clay mud	1080	64	16	68	50	64	18	9,0
№ 1+0,5 % лигносульфоната нейтрально-сульфитного щелока No. 1+0,5 % lignosulfonates of neutral-sulphite lye	1080	52	9	81	48	81	18	9,1
№ 1+0,5 % НТФ/No. 1+0,5 % NTF	1080	23	18	22	8	5	22	9,0
№ 1+0,5 % ТПФ/№ 1+0,5 % TPF	1080	24	10	96	0	10	8	9,0
№ 1+0,5 % ФХЛС-2М/No. 1+0,5 % FCLS-2M	1080	25	10	20	7	10	9	9,0
Термостатирование при T=150 °C/Thermostating at T=150 °C, 3 hours								
№ 1+0,5 % НТФ/No. 1+0,5 % NTF	1080	26	34	19	0	0	28	9,2
№ 1+0,5 % ТПФ/№ 1+0,5 % TPF	1080	48	16	48	14	18	9	9,1
№ 1+0,5 % ФХЛС-2М/No. 1+0,5 % FCLS-2M	1080	26	10	38	10	12	8	8,9

Таблица 4. Параметры глинистого раствора с 1 % добавками ФХЛС, НТФ и ТПФ на нейтральном и сульфитном ЛСТ. Время термообработки 3 часа

Table 4. Parameters of clay mud with 1 % additives FCLS, NTF and TPF for neutral sulfite and LST. Cooking time is 3 hours

Состав/Composition	T, °C	Параметры/Parameters							
		ρ , кг/м ³ ρ , kg/m ³	УВ, с UV, s	$\eta_{\text{пп}}$, МПа·с $\eta_{\text{пл}}$, mPa·s	τ_0 , дПа τ_0 , dPa	СНС, дПа SNS, dPa		ПФ, см ³ /30 мин PF, cm ³ /30 min	рН
						1	10		
№ 1 Исходный глинистый раствор No. 1 Initial clay mud	20	1090	60	12	103	97	132	15	8,9
	150	1080	81	13	126	106	141	21	9,2
	190	1009	86	15	119	96	140	25	9,1
№ 1+1 % ФХЛС на сульфитном ЛСТ No. 1+1 % FCLS on sulphite LST	20	1060	37	13	69	45	63	10	8,8
	150	1040	48	15	75	39	53	14	9,1
	190	1060	75	15	107	94	129	16	9,0
№ 1+1 % ФХЛС на нейтрально-сульфитном ЛСТ+НТФ No. 1+1 % FCLS on sulphite LST+NTF	20	1030	25	10	50	9	17	8	9,2
	150	1050	27	12	52	12	15	11	9,0
	190	1060	25	14	57	15	44	18	9,0
№ 1+1 % ФХЛС на нейтрально-сульфитном ЛСТ+ТПФ No. 1+1 % FCLS on sulphite LST+TPF	20	1060	26	11	50	9	16	9	9,2
	150	1060	27	13	51	13	15	11	9,0
	190	1040	30	15	56	15	42	16	9,0

Исследованиями показана возможность получения комплексных соединений, содержащих фосфоновые группы, сшитые с матрицей лигносульфоната и имеющие не только алифатические, но и ароматические фрагменты, на примере фенилпропанового звена лигносульфонатов.

Перспективным представляется также направление «облагораживания» лигносульфонатной матрицы за счет реакций деметилирования с получением пирокатехинатов, способных повысить исходные качественные показатели сырья – нейтрально-сульфитного щелока, являющегося мало-

востребованным, однако потенциально перспективным в экологическом и стоимостном плане сырьевым компонентом, пригодным для получения реагентов для буровых промысловых жидкостей.

В целом исследование физико-химических свойств и особенностей щелоков нейтрально-сульфитной варки показало, что они, несмотря на сниженную реакционную способность, являются весьма перспективным компонентом для получения реагентов, особенно в условиях повышенного спроса на возобновляемые сырьевые источники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кистер Э.Г. Химическая обработка буровых растворов. – М.: Недра, 1972. – 392 с.
2. Lauzon R.V., Short J.S. The Colloidal Interaction of Ferrochrome Lignosulfonate with Montmorillonite in Drilling Fluid Applications // Society of Petroleum Engineers. – 1979. – URL: <https://doi.org/10.2118/8225-MS> (дата обращения: 15.05.2017).
3. Реакционная способность сульфитных щелоков как основы буровых реагентов / Г.А. Тептерева, И.Н. Куляшова, Л.Х. Асфандияров, Г.В. Конесев, А.Д. Бадикова, И.А. Четвертнёва // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. – 2015. – № 3. URL: http://www.o.g.b.u.s.r.u/i.s.s.u.e.s/3_2015/o.g.b.u.s.r.u.p.91-115_TepterevaGA_ru.pdf (дата обращения: 31.05.2017).
4. Совершенствование процесса получения хромлигносульфонатных буровых реагентов: монография / А.Д. Бадикова, Г.А. Тептерева, И.Н. Куляшова, Р.А. Ялалова, Ф.Х. Кудашева. – Уфа: Изд-во БашГУ, 2015. – 108 с.
5. Park L.S. A New Chrome-Free Lignosulfonate Thinner: Performance without Environmental Concerns // Society of Petroleum Engineers. – 1988. – URL: <https://doi.org/10.2118/16281-PA> (дата обращения: 17.05.2017).
6. Meister J.J., Patil D.R., Channell H. Synthesis, Characterization, and Testing of Lignin Graft Copolymers for Use in Drilling Mud Applications // Society of Petroleum Engineers. – 1985. – URL: <https://doi.org/10.2118/13559-MS> (дата обращения: 15.05.2017).
7. Li-Ming Zhang, Dai-Yi Yin. Novel modified lignosulfonate as drilling mud thinner without environmental concerns // Applied Polymer science. – 1999. – V. 74. – Iss. 7. – P. 1662–1668.
8. Structural modification of commercial lignosulphonates through laccase catalysis and ozonolysis / D. Areskogh, Jiebing Li, G. Gellerstedt, G. Henriksson // Industrial Crops and Products. – 2010. – V. 32. – № 3. – P. 458–466.
9. Jie Zhang, Gang Chen, Nai-wang Yang. Development of a New Drilling Fluid Additive from Lignosulfonate // Advanced Materials Research. – 2012. – V. 505–507. – P. 1157–1160.
10. Preparation of Nitration-oxidation Lignosulfonate as an Eco-friendly Drilling Fluid Additive / J. Zhang, G. Chen, N.-W. Yang, Y.-G. Wang // Journal Petroleum Science and Technology. – 2014. – V. 32. – Iss. 14. – P. 1661–1668.
11. Айзенштадт А.М. Оксредметрия в химии и химической технологии древесины: автореф. дис. ... д-ра хим. наук. – Архангельск, 1998. – 40 с.
12. Microbial treatment of industrial lignin: Successes, problems and challenges / A.I. Brzonova, E. Kozliak, A. Kubatova, Yun Ji // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – V. 77. – P. 1179–1205.
13. Оболенская А.В., Леонович А.А. Химия древесины. – Л.: Изд-во ЛТА, 1989. – 89 с.
14. Исследование комплексообразующих и технологических свойств реагентов для нефтедобычи, получаемых модификацией сульфитных щелоков фосфоновыми группами / И.Н. Куляшова, Г.А. Тептерева, Л.Х. Асфандияров, Г.В. Конесев, Т.Д. Дихтярь, А.Д. Бадикова // Нефтегазовое дело: электрон.

- науч. журн. – 2015. – № 1. URL: http://www.ogbus.ru/issues/1_2015/ogbus_1_2015_p406-425_KulyashovaIN_ru.pdf (дата обращения: 31.05.2017).
15. Гаврилов Б.М. Лигно-полимерные реагенты для буровых растворов. – Краснодар: [б.и.], 2004. – 523 с.
 16. Тептерева Г.А., Конесев Г.В., Исмаков Р.А. Основы получения и применения лигносульфонатов в буровой технологии. – Берлин: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 70 с.
 17. Закис Г.Ф. Функциональный анализ лигнинов и их производных. – Рига: Зинатне, 1987. – 265 с.
 18. Комплексообразование в окислительно-восстановительных системах / под ред. Б.П. Никольского, В.В. Пальчевского. – Душанбе: Изд-во ТГУ, 1973. – 153 с.
 19. Сарканен К.В., Людвиг К.Х. Лигнины: структура, свойства и реакции. – М.: Лесная промышленность, 1981. – 402 с.
 20. Дятлова Н.М., Темкина В.Я., Попов К.И. Комплексоны и комплексоны металлов. – М.: Химия, 1988. – 467 с.

Поступила 18.08.2017 г.

Информация об авторах

Тептерева Г.А., кандидат химических наук, доцент кафедры бурения нефтяных и газовых скважин горно-нефтяного факультета Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Конесев Г.В., доктор технических наук, профессор кафедры бурения нефтяных и газовых скважин горно-нефтяного факультета Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Исмаков Р.А., доктор технических наук, профессор кафедры бурения нефтяных и газовых скважин горно-нефтяного факультета Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Кантор Е.А., доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой физики факультета общенаучных дисциплин Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Дихтярь Т.Д., кандидат технических наук, доцент кафедры разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском.

UDC 622.24

OBTAINING DRILL REAGENTS BY MODIFICATION OF NEUTRAL-SULPHITE ALKALI PHOSPHONIC COMPOUNDS

Galina A. Teptereva¹,
teptereva.tga@yandex.ru

Gennady V. Konesev¹,
konecev burenie@mail.ru

Rustem A. Ismakov¹,
ismakovrustem@gmail.com

Eugeny A. Kantor¹,
evgkantor@mail.ru

Tatiana D. Dikhtyar²,
dihttd@gmail.com

¹ Ufa State Petroleum Technical University,
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450064, Republic of Bashkortostan, Russia.

² Branch of Ufa State Petroleum Technical University in Oktyabrsky City,
54, Devonskaya street, Oktyabrsky, 452620, Republic of Bashkortostan, Russia.

Relevance of the work is determined by the task of developing low-toxic, biodegradable and inexpensive reagents for water based drilling muds chemical treatment. In this connection, the paper considers the methods for increasing the reactivity of neutral-sulphite liquors used as the basis of such reagents.

The aim of the research is to study the feasibility of using phosphonic compounds in preparation of reagents based on neutral-sulphite liquors for treatment of drilling flushing fluids in order to improve their technological parameters

Research methods: instrumental methods for determining drilling fluids parameters for taxivay 39–00147001–773–2004 (ρ is the density, RV is the relative viscosity, η_{pl} is the plastic viscosity, τ_0 is the yield point, the SSS is the static shear stress, IF is the index filtration, pH is the index of hydrogen ions content) supplemented with neutral sulfite liquors phosphonic compounds in acid nitrilomethylenephosphonic, sodium tripolyphosphate for both separate and combined entering into composition of drilling liquid

Results. It was ascertained that inclusion of phosphonic compounds in composition of drilling reagents based on the neutral-sulfite liquor allows improving quality indicators of drilling fluids, contributing to sustainability of drilling system parameters to exposure of higher downhole temperature and mineral aggression providing high-thinning ability and reducing the drilling mud filtration rate. These properties of drilling reagents, modified by phosphonic compounds, allow converting low-reaction liquors used as the basis, to the part of the advanced resource-renewable domestic raw materials.

Conclusion. Investigation of physicochemical properties and characteristics of liquors of neutral-sulfite digestion showed that, in spite of the reduced reactivity, they are a very promising component for reagents obtaining, especially in conditions of increased demand for renewable raw materials sources.

Key words:

Neutral-sulphite liquor, lignosulfonate, phosphonic compounds, delignification, complex compounds, drilling fluids, conditional viscosity, filtration index.

REFERENCES

- Kister E.G. *Khimicheskaya obrabotka burovyykh rastvorov* [Drilling fluids chemical treatment]. Moscow, Nedra Publ., 1972. 392 p.
- Lauzon R.V., Short J.S. The Colloidal Interaction of Ferrochrome Lignosulfonate with Montmorillonite in Drilling Fluid Applications. *Society of Petroleum Engineers*, 1979. Available at: <https://doi.org/10.2118/8225-MS> (accessed 15 May 2017).
- Teptereva G.A., Kulyashova I.N., Asfandiyarov L.Kh., Konesev G.V., Badikova A.D., Chetvertneva I.A. Reaktsionnaya sposobnost sulfitnykh shehelokov kak osnovy burovyykh reagentov [Sulphite liquors reactivity as drilling reagents basis]. *Neftegazovoe delo: elektron. nauch. zhurn*, 2015, no. 3. Available at: http://www.ogbus.ru/issues/3_2015/ogbus_3_2015_p91-115_TepterevaGA_ru.pdf (accessed 31 May 2017).
- Badikova A.D., Teptereva G.A., Kulyashova I.N., Yalalova R.A., Kudasheva F.Kh. *Sovershenstvovanie protsessy polucheniya khromlignosulfonatnykh burovyykh reagentov: monografiya* [Perfection of obtaining chrome-lignosulfonate drilling reagents: monograph]. Ufa, BashGU Publ., 2015. 108 p.
- Park L.S. A New Chrome-Free Lignosulfonate Thinner: Performance Without Environmental Concerns. *Society of Petroleum Engineers*, 1988. Available at: <https://doi.org/10.2118/16281-PA> (accessed 17 May 2017).
- Meister J.J., Patil D.R., Channell, H. Synthesis, Characterization, and Testing of Lignin Graft Copolymers for Use in Drilling Mud Applications. *Society of Petroleum Engineers*, 1985. Available at: <https://doi.org/10.2118/13559-MS> (accessed 15 May 2017).
- Li-Ming Zhang, Dai-Yi Yin. Novel modified lignosulfonate as drilling mud thinner without environmental concerns. *Applied Polymer science*, 1999, vol. 74, Iss. 7, pp. 1662–1668.
- Areskog D., Jiebing Li, Gellerstedt G., Henriksson G. Structural modification of commercial lignosulphonates through laccase

- catalysis and ozonolysis. *Industrial Crops and Products*, 2010, vol. 32, no. 3, pp. 458–466.
9. Jie Zhang, Gang Chen, Nai-wang Yang. Development of a New Drilling Fluid Additive from Lignosulfonate. *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 505–507, pp. 1157–1160.
 10. Zhang J., Chen G., Yang N.-W., Wang Y.-G. Preparation of Nitration-oxidation Lignosulfonate as an Eco-friendly Drilling Fluid Additive. *Journal Petroleum Science and Technology*, 2014, vol. 32, Iss. 14, pp. 1661–1668.
 11. Ayzenshtadt A.M. *Oksredmetriya v khimii i khimicheskoy tekhnologii drevesiny*. Dis. Dokt. nauk [Oxidimetry in chemistry and wood chemical technology. Dr. Diss.]. Arkhangelsk, 1998. 40 p.
 12. Brzonova A.I., Kozliak E., Kubatova A., Yun Ji. Microbial treatment of industrial lignin: Successes, problems and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 77, pp. 1179–1205.
 13. Obolenskaya A.V. *Khimiya lignin* [Lignin chemistry]. St-Petersburg, LTA Publ., 1993. 80 p.
 14. Kulyashova I.N., Teptereva G.A., Asfandiyarov L.Kh., Konesev G.V., Dikhtyar T.D., Badikova A.D. Issledovanie kompleksobrazuyushchikh i tekhnologicheskikh svoystv reagentov dlya nefte dobychi, poluchaemykh modifikatsiy sulfitnykh shchelokov fosfonovymi gruppami [Oil production reagents complex-forming and technological properties investigation obtained by sulphite liquors with phosphonic groups modification]. *Neftegazovoe delo: elektron. nauch. zhurn*, 2015, no. 1. Available at: http://www.ogbus.ru/issues/1_2015/ogbus_1_2015_p406-425_KulyashovaIN_ru.pdf (accessed 31 May 2017).
 15. Gavrillov B.M. *Ligno-polimernye reagenty dlya burovyykh rastvorov* [Ligno-polymeric reagents for drilling fluids]. Krasnodar, 2004. 523 p.
 16. Teptereva G.A., Konesev G.V., Ismakov R.A. *Osnovy polucheniya i primeneniya lignosulfonatov v burovoy tekhnologii* [Principles of obtaining and using lignosulfonates in drilling]. Berlin, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. 70 p.
 17. Zakis G.F. *Funktsionalny analiz ligninov i ikh proizvodnykh* [Functional analysis of lignins and their derivatives]. Riga, Zinatne Publ., 1987. 265 p.
 18. *Kompleksoobrazovanie v oksiditelno-voosstanovitelnykh sistemakh* [Complexation in oxidation-reduction systems]. Eds. B.P. Nikolskiy, V.V. Palchevskiy. Dushanbe, TGU Publ., 1973. 153 p.
 19. Sarkanen K.V., Lyudvig K.Kh. *Ligniny: struktura, svoystva i reaktivnosti* [Lignins: structure, properties and reactions]. Moscow, Lesnaya promyshlennost Publ., 1981. 402 p.
 20. Dyatlova N.M., Temkina V.Ya., Popov K.I. *Kompleksy i kompleksony metallov* [Metals Complexes and Complexes]. Moscow, Khimiya Publ., 1988. 467 p.

Received: 18 August 2017.

Information about the authors

Galina A. Teptereva, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technical University.

Gennady V. Konesev, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technical University.

Rustem A. Ismakov, Dr. Sc., professor, Vice-rector, Ufa State Petroleum Technical University.

Eugeniy A. Kantor, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technical University.

Tatiana D. Dikhtyar, Cand. Sc., associate professor, Branch of Ufa State Petroleum Technical University in Oktyabrsky City.

УДК 556.06:551.482.212

МИНЕРАЛОГО–ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ МАЛЫХ РЕК В МЕЖДУРЕЧЬЕ РЕК ЛО И КАУ (СЕВЕРНЫЙ ВЬЕТНАМ)

Савичев Олег Геннадьевич¹,
OSavichev@mail.ru

Домаренко Виктор Алексеевич¹,
victor_domarenko@mail.ru

Перегудина Елена Владимировна¹,
pere-elena@mail.ru

Нгуен Ван Луен²,
Luyennv@yahoo.com

Шалдыбин Михаил Викторович¹,
ShaldybinMV@tpu.ru

Канаки Алексей Владимирович³,
KanakiA@mail.ru

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

² Институт геологии и минеральных ресурсов,
Вьетнам, 100000, г. Ханой, Чьен Тханг, Тхань Суан, 67.

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Актуальность работы. Исследования минерального и химического состава донных отложений имеют важное значение в разработке и усовершенствовании методик гидрогеохимических поисков полезных ископаемых и решения задач нормирования антропогенного воздействия на поверхностные и подземные водные объекты.

Цель работы: оценка минерального и химического состава речных отложений в междуречье рек Ло и Кау (север Вьетнама) как причины и следствия процессов формирования геохимических аномалий в водных объектах.

Методы исследования: математическое моделирование, ландшафтно-геохимический и статистические методы, методы определения химического и минерального состава донных отложений.

Результаты и выводы. Получены данные о минеральном и химическом составе донных отложений рек Бан Тхи и Дай (Северный Вьетнам, провинция Баккан) в меженный период 2016 г. Выполнен анализ взаимосвязей между минеральным и химическим составом донных отложений водотоков, водных вытяжек из них и речных вод. Показано, что концентрации целого ряда химических элементов прямо пропорциональны содержанию хлоритов и обратно пропорционально содержанию кварца. Установлено, что карбонатный барьер играет важную роль в регуляции химического состава речных вод в зоне влияния горнодобывающих предприятий, связанных с добычей свинцово-цинковых руд. Получены ориентировочные оценки расстояния переноса твёрдых частиц (до 34 км в период дождей) и среднего времени приближения к насыщению речных вод относительно кальция (примерно 9,4 часа). Обоснован вывод о ключевой роли геохимических барьеров в формировании геоэкологических условий разработки месторождений твёрдых полезных ископаемых, в том числе снижении концентраций цинка, свинца и ряда других элементов в речных водах и донных отложениях на участках до 10–11 км.

Ключевые слова:

Северный Вьетнам, донные отложения, минеральный и химический состав, малые реки, геохимические аномалии.

Введение

Выявление геохимических аномалий является одним из важных этапов поисков полезных ископаемых, а также оценки фактического и допустимого состояния компонентов окружающей среды. Обычно решение этой задачи сводится к отбору и последующему анализу большого количества проб коренных пород, почв, донных отложений водных объектов, поверхностных, подземных и атмосферных вод, фрагментов растительности по узлам регулярной сети пунктов с плотностью

один комплекс проб компонентов окружающей среды на 4 км² и более. Вследствие этого подобные работы в целом трудоёмки и дорогостоящи вплоть до полной потери рентабельности [1]. С учётом этого в Томском политехническом университете (ТПУ) проводятся исследования с целью совершенствования как методик геохимических и гидрогеохимических поисков полезных ископаемых, экологического мониторинга, так и геохимических моделей, на основе которых эти методики разработаны [2–4].

В частности, авторами в последние годы была разработана и апробирована упрощённая математическая модель изменения химического состава речных вод и донных отложений в зависимости от площади водосбора и слоя водного стока:

$$C = C_0 \frac{Y_0}{Y} \left(\frac{F_0}{F} \right)^k, \quad (1)$$

где C , Y , F – концентрация вещества (мг/дм³ или мг/кг), слой водного стока (мм) и площадь водосбора (км²) в расчётном створе; C_0 , Y_0 , F_0 – концентрация вещества (мг/дм³ или мг/кг), слой водного стока (мм) и площадь водосбора (км²) в истоках реки без выраженной русловой сети; k – эмпирический коэффициент, учитывающий размерность элементов уравнения (1) и отражающий зависимость между слоем стока и средней глубины потока, а также удельную скорость трансформации вещества [5].

В работе [6] было предложено описание водного стока в виде:

$$Y_a = \mu H_a \exp\left(-\frac{E_0}{H_a}\right) \left(1 + \frac{Cv_H^2 E_0^2}{2H_a^2}\right), \quad (2)$$

$$\mu = k_{Y,1} k_Z^{k_{Y,2}} (f_F + 1)^{k_{Y,3}} (f_M + 1)^{k_{Y,4}}, \quad (3)$$

$$k_Z = \begin{cases} Z_b - 500, & Z_b > 500 \\ 1, & Z_b \leq 500 \end{cases}, \quad (4)$$

где Y_a – среднееголетний слой водного стока, мм/год; H_a – среднееголетний слой общего увлажнения, складывающегося из жидких атмосферных осадков, водоотдачи из снежного покрова и ледовых образований; Cv_H – коэффициент вариации годовых значений слоя общего увлажнения; E_0 – среднееголетнее значение испаряемости, мм/год; μ – функция влияния физико-географических условий на водный сток; Z_b – средняя высота водосбора, м; f_M – заболоченность водосбора, %; f_F – лесистость водосбора, %; $k_{Y,1}$, $k_{Y,2}$, $k_{Y,3}$, $k_{Y,4}$ – эмпирические коэффициенты (величина $k_{Y,4}$ обычно принимает отрицательные значения). Это позволило исключить трудоёмкие работы по определению слоя водного стока и (с учётом уравнений (2–4), а также допущения постоянства увлажнения и испаряемости на водосборе) привести (1) к виду:

$$C = C_0 \frac{\mu_0}{\mu} \left(\frac{F_0}{F} \right)^k, \quad (5)$$

где μ и μ_0 – функция влияния физико-географических условий на водный сток на исследуемом водосборе в целом и его верхней части без выраженной русловой сети.

В дальнейшем модель (1, 3–5) была дополнена анализом сопряжённости речной сети и тектонических нарушений [1]. При его проведении густота речной сети интерпретируется как вероятность направленного движения поверхностных вод по водосбору $P(r)$, плотность распространения тектони-

ческих нарушений в пределах водосбора (отношение суммарной длины нарушений к площади водосбора) – как вероятность $P(f)$, а условная вероятность $P(r/f)$ – как характеристика сопряжённости речной сети и тектонических нарушений.

Наиболее полную адаптацию этого подхода к решению региональных геохимических задач выполнил Нгуен Ван Луен, показавший для междуречья рек Ло и Кау на севере Вьетнама, что вероятность обнаружения аномальных концентраций Pb и Zn в донных отложениях и речных водах заметно возрастает при условии, что соотношение F/F_0 меньше 6–7, а величина $P(r/f)$ превышает 0,6 км/км² [7]. В то же время остались нерешёнными вопросы объяснения полученных критерияльных значений F/F_0 и $P(r/f)$ на основе анализа минерального и химического состава компонентов окружающей среды, без чего невозможно эффективное применение модели (1, 5) в других регионах. Это и определило цель исследования – выявление закономерностей территориального изменения минерального и химического состава речных отложений в северной части Вьетнама.

Объекты и методика исследования

В качестве объектов исследования выбраны реки Бан Тхи, Дай и их притоки Ченгу (впадает в реку Бан Тхи), Фодай, Намду (в реку Дай) – малые водотоки в бассейне реки Хонг (Красная). Река Дай – элемент системы «Дай–Ло–Хонг», река Бан Тхи – элемент системы «Бан Тхи–Гам–Ло–Хонг». Водосборы указанных рек расположены в низко- и среднегорье. В их геологическом строении принимают участие отложения ордовик-силурийской и девонской системы, местами прорванные разновозрастными интрузивами габбро-гранитной серии. Рассматриваемая территория характеризуется наличием множественных проявлений и мелких месторождений свинца, цинка, железа, марганца, разрабатываемых в настоящее время или ранее [7–10].

Ранее, в работах [1, 7, 11], достаточно подробно охарактеризован химический состав вод речных вод и водных вытяжек из донных отложений в уезде Чодонь провинции Баккан. В том числе 19–20 февраля 2016 г. Нгуен Ван Луеном были отобраны 11 проб речных вод и 11 проб донных отложений (рис. 1; пробоотбор проводился из верхнего слоя толщиной 20 см с последующим отсевом фракции менее 0,5 мм). Лабораторные работы выполнены в ТПУ (аккредитованная гидрогеохимическая лаборатория при кафедре гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии; номер государственной аккредитации № РОСС RU.0001.511901 от 12.07.2011 г.) с использованием потенциометрического (рН), титриметрического (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , CO_2 , Cl^- , перманганатная и бихроматная окисляемости), турбидиметрического (SO_4^{2-}), фотометрического (Si, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-}) методов, масс-спектрометрического метода с индуктивно-связанной плазмой (с использовани-

ем масс-спектрометра NexION 300D: Si, Li, Al, P, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Ag, Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Au, Hg, Pb, Bi), ионной хроматографии (Na^+ , K^+).

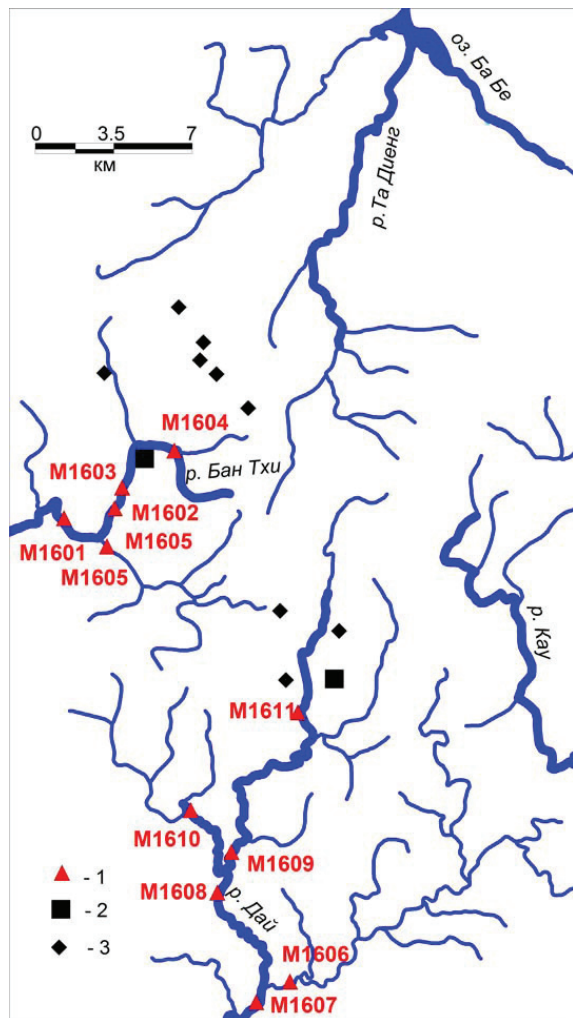


Рис. 1. Схема расположения пунктов отбора проб речных вод и донных отложений малых водотоков в междуречье рек Ло и Кау 19–20 февраля 2016 г.: 1 – пункты отбора проб речных вод и донных отложений; 2 – горнообогатительные фабрики; 3 – рудники

Fig. 1. Layout of sampling points in the area between the Lo and Kau minor rivers on 19–20 February, 2016: 1 are the sampling points of river waters and sediments; 2 are the ore factories; 3 are the mines

Химический состав водных вытяжек в некотором приближении может рассматриваться как характеристика наиболее подвижных форм химических элементов в донных отложениях. Поэтому в 2017 г. в тех же (заранее подготовленных и хранившихся в герметичных ёмкостях) образцах были дополнительно выполнены: 1) проведен количественный анализ на различные элементы на томском исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т НИИЯФ при ТПУ, использовался метод ИНАА (инструментальный нейтронно-активационный анализ), который может определять concentra-

цию (мг/кг) 28 химических элементов. В основе метода лежит регистрация радиоактивных радионуклидов, которые появляются при облучении исследуемых проб (навеска 0,1 г) потоком нейтронов с интегральной дозой $2 \cdot 10^{13}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. При проведении измерений использовался гамма-спектрометр с германий-литиевым детектором; 2) для определения минерального состава донных отложений использовался сканирующий электронный микроскоп HITACHI S-3400N с энерго-дисперсионной приставкой Bruker X Flash 4010. Элементная составляющая была получена при фиксации тормозящего рентгеновского излучения. Пробы исследовались при низком вакууме в режиме обратно-рассеянных электронов. Лабораторные работы выполнены сотрудниками кафедры геоэкологии и геохимии ТПУ: химический состав – аналитики А.Ф. Судыко, Л.В. Богутская; электронная микроскопия – аспирант Е.В. Перегудина Съёмка дифрактограмм проводилась на дифрактометре Rigaku Ultima IV при следующих параметрах: анод – Cu, 40 кВ, 30 мА, 1,2 кВт, скорость $1^\circ/\text{мин}$, шаг $0,02^\circ$, в диапазоне углов 4–65 (аналитик – А.В. Канаки).

Анализ результатов рассматриваемого исследования и ранее полученных материалов [1, 7, 11] включал:

1) расчёт индексов насыщения η речных вод и водных вытяжек относительно ряда минералов и органоминеральных комплексов;

$$\eta = \lg \dot{I} \dot{A} - \lg K_{\text{неq}}, \quad (6)$$

где ПА – произведение активностей группы веществ; $K_{\text{неq}}$ – константа неустойчивости; кроме ряда минералов, также учитывалась возможность образования соединений ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} с гуминовыми кислотами (ГК), концентрация которых была определена расчётным путём по эмпирической зависимости от перманганатной окисляемости [11]; описание методики термодинамических расчётов приведено в [12];

2) корреляционный и регрессионный анализ результатов термодинамических расчётов и данных о минеральном и химическом составе донных отложений; коэффициент корреляции r_{xy} величин x и y принимался статистически значимым (с уровнем значимости 5 %) при выполнении условия (7), а регрессионная зависимость (например, вида $y = a_0 + a_1 \cdot x$) – при условии, что квадрат корреляционного отношения [13] $R^2 > 0,36$, а коэффициенты регрессии (a_i) по модулю меньше удвоенной погрешности их определения:

$$|r| > 2(1 - r_{xy}^2)(N - 1)^{-0,5}, \quad (7)$$

где N – объём выборки. Расчёты выполнены с использованием пакета MS Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ полученных материалов показал, что во фракции донных отложений исследуемых рек с частицами диаметром менее 0,5 мм преобладает

кварц, достаточно широко представлены слюды, гидрослюды и хлориты (табл. 1). Менее распространены полевые шпаты группы плагиоклазов и карбонаты, причём наибольшее содержание кальцита (3 %) отмечено в 2,8 км ниже по течению от горно-обогатительной фабрики. Выше по течению от фабрики кальцит не отмечен вовсе.

Концентрации большинства изученных химических элементов (Cr, Co, Ba, Cs, Sc, Rb, U, Th, Nd, Sm, Lu, Yb, Tb, Ta, Eu, La, Fe и Ce) во фракции донных отложений с диаметром частиц менее 0,5 мм прямо пропорциональны содержанию каолинита и хлорита, слюд и гидрослюд и обратно пропорциональны содержанию кварца. Примерно для этих же элементов и минералов характерна соответствующая связь с содержанием серы в водной вытяжке из донных отложений. В то же время прямая статистически значимая корреляция с содержанием полевых шпатов отмечена для Co, Cr, Sm, Lu, Yb, Nd, Cs, Tb, Sc, Rb, Ta, Eu, La, U, Th; с содержанием кальцита – для Ca, Fe, Au, As, Ag, Br, Zn, Co, Sb (табл. 2).

Подобные взаимосвязи объясняются следующим. Во-первых, в период повышенной водности (с расходами воды выше среднегодовых значений, обычно – с июня по сентябрь) происходит вынос частиц взвешенных и влекомых наносов с относительно незначительной устойчивостью к химическому выветриванию. В последующий меженный период, по мере снижения транспортирующей способности потока при уменьшении расходов воды, происходит аккумуляция этих частиц и активизируется, с одной стороны, процесс их химического выветривания, а с другой стороны, сорбционные процессы [14–16].

Для проверки этой гипотезы были рассчитаны ориентировочные значения протяжённости участков переноса взвешенных наносов L_{ss} для максимальных, среднемноголетних и меженных расходов воды из условий (8–15):

$$L_{ss} \cdot u_{d,a} \approx v_a \cdot h_a, \quad (8)$$

$$v_t \approx \frac{v_a}{\sqrt{N_K}}, \quad (9)$$

$$u_{d,a} \approx v_t, \quad (10)$$

$$N_K = \frac{M_K \cdot C_{Ch}}{g}, \quad (11)$$

$$M_K = \begin{cases} 0,7 \cdot C_{Ch} + 6, & 10 \leq C_{Ch} \leq 60 \\ 48, & C_{Ch} > 60 \end{cases}, \quad (12)$$

$$C_{Ch} = \frac{h_a^6}{n_r}, \quad (13)$$

$$v_a \approx C_{Ch} \cdot \sqrt{h_a \cdot J}, \quad (14)$$

$$u_{d,a} \approx k_u \cdot \sqrt{D_{ss,a}}, \quad (15)$$

где $u_{d,a}$ – гидравлическая крупность частиц наносов со средним диаметром $D_{ss,a}$; v_a – средняя скорость течения; v_t – среднее абсолютное значение пульсационной скорости согласно [17, 18]; C_{Ch} – коэффициент Шези; n_r – коэффициент шероховатости; J – уклон водной поверхности; h_a – средняя глубина потока; k_u – коэффициент, учитывающий форму и размер частицы (принято среднее значение 0,154 для $u_{d,a}$ в м/с и $D_{ss,a}$ в мм); g – ускорение свободного падения.

Меженные расходы воды приняты по материалам полевых работ, выполненных Нгуен Ван Луюном в феврале 2016 г., среднемноголетний расход воды рассчитан по модулю стока реки Гам в створе пункта Чемхоа [7], максимальный дождевой расход обеспеченностью 10 % – по формуле (16) согласно [19]. Глубина и ширина потока при разных расходах воды определена подбором (методом Ньютона) из условия (17) согласно [20], скорость течения вычислена по формуле Шези (14):

$$Q_{\max,10\%} = k_Q \cdot a_{10\%} \cdot F, \quad (16)$$

$$M_\Gamma = \frac{h_a (gB)^{0,25}}{Q^{0,5}}, \quad (17)$$

где Q – расход воды ($Q_{\max,10\%}$ – расчётный максимальный расход дождевого паводка обеспеченностью 10 %); k_Q – сборный коэффициент, учитывающий размерность величин в формуле (16), влияние площади водосбора и уклона реки на интенсивность осадков, оказывающую влияние на расход воды в реке; $a_{10\%}$ – интенсивность дождя; F – площадь водосбора; B – ширина потока; M_Γ – константа устойчивости русла согласно [20]. Результаты расчёта (рис. 2) свидетельствуют о том, что максимальный перенос взвешенных частиц в период дождей может достигать не менее 34 км, в среднем перенос составляет около 1,4–4,0 км на реке Бан Тхи и 1,7–3,0 км – на реке Дай.

В меженный период речные воды не равновесны к первичным алюмосиликатам, но близки к равновесию к кварцу, карбонатам и соединениям кальция и магния с гуминовыми кислотами (табл. 3). Время взаимодействия частиц наносов и донных отложений возрастает по мере удаления от истоков рек. Соответственно, для больших и средних рек в общем случае должна увеличиваться доля устойчивых к химическому выветриванию частиц, что вполне подтверждается результатами анализа минерального состава донных отложений, как изученных рек Вьетнама, так и реки Томь в Западной Сибири [12]. В частности, в составе фракции донных отложений диаметром менее 0,5 мм преобладает кварц, причём наблюдается последовательное увеличение его доли по мере приближения к устью (табл. 1).

Для реки Бан Тхи изменение доли кварца в донных отложениях происходит не столь выра-

женно, что объясняется как меньшими значениями водного стока (следовательно, меньшей промытостью водосбора), так и влиянием притока Ченгу (пункт M1601 расположен ниже по течению от устья этой реки). Также следует отметить, что указанные гидрологические и геохимические процессы являются стохастическими и нестационарными. Например, растворение полевых шпатов, входящих в состав донных отложений, может блокироваться слоем глинистых отложений [21], размыв которых меняется во времени по длине и ширине потока случайным образом. Поэтому о каких-либо пространственно-временных закономерностях изменения химического и минерального состава донных отложений можно говорить только в статистическом смысле.

Во-вторых, согласно [22–24], карбонатный барьер играет важную роль в регулировании химического состава речных вод и водных вытяжек из донных отложений. С одной стороны, этот барьер ограничивает рост концентраций главных ионов в речных водах, а с другой – в ряде случаев

способствует снижению общей минерализации, о чём свидетельствует как изменение концентраций главных ионов, так и индексов насыщения относительно карбонатных минералов (табл. 1, 3). Аналогичный эффект, возможно, связан и с образованием малорастворимых соединений ряда металлов с гуминовыми кислотами [25–27].

В рамках ориентировочной оценки времени релаксации геохимической системы был использован следующий алгоритм: 1) значения индексов насыщения вод и водных вытяжек из донных отложений рек Бан Тхи и Дай (ниже по течению от горно-обогатительных фабрик) аппроксимируются полиномами вида (18):

$$\eta_L = \sum_{i=0}^3 b_i (L + \Delta L)^i, \quad (18)$$

где η_L – значение индекса насыщения относительно кальцита на расстоянии L от истока реки; b_i – эмпирический коэффициент; L – расстояние створа от истока реки; ΔL – удаление от створа, при котором наступает максимальное приближение к

Таблица 1. Характеристика минерального и химического состава донных отложений малых рек в междуречье рек Ло и Кау 19–20 февраля 2016 г.

Table 1. Characteristic of mineral and chemical composition of river bottom sediments in the area between the Lo and Kau minor rivers on the 19–20 February, 2016

Показатель/Index	Единицы измерения Units	Пункт отбора проб воды (рис. 1)/Points of water sampling (Fig. 1)										
		M1604	M1603	M1602	M1601	M1605	M1611	M1609	M1608	M1607	M1610	M1606
		Бан Тхи/ Ban Thi			Ченгу Chengu	Дай/ Dai				Намду Namdu	Фодай Pho Dai	
Геологическая формация* Geological formation	–	Pia Phuong				Mia Le; Khao Loc	Phu Ngu			Pia Phuong	Phu Ngu	
Морфометрические и гидрологические характеристики рек и их водосборов Morphometric and hydrological characteristics of rivers and their catchment areas												
Длина реки от истока L Length of the river head L	км km	3,68	7,84	8,99	13,14	7,98	16,12	29,57	32,82	41,68	11,32	32,9
Площадь водосбора F Area of the river basin F	км ² km ²	16,1	71,4	75,4	134	48	43,8	110,5	164,8	182,3	40,8	129
Скорость течения v_a /Velocity v_a	м/с/m/s	0,08	0,19	0,09	0,12	0,26	0,20	0,45	0,20	0,27	0,20	0,42
Расход воды Q Discharge Q	м ³ /с/m ³ /s	0,23	0,42	0,42	0,71	0,29	0,98	1,24	3,46	4,39	1,11	1,53
Содержание минерала во фракции донных отложений с диаметром частиц <0,5 мм Mineral content in the river fraction of bottom sediments with particle diameter <0,5 mm												
Класс оксидов: кварц/Quartz	–	78,0	73,0	83,4	46,0	59,2	68,1	74,1	83,0	88,2	90,0	90,0
Класс силикатов: группа полевых шпатов: подгруппа плагиоклаза Plagioclase	–	3,6	2,1	1,0	2,5	2,0	3,6	1,2	1,0	1,3	1,0	1,0
Класс силикатов: группа полевых шпатов (КПШ): подгруппа ортоклаза/Potassium feldspar	–	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	2,8	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0
Класс карбонатов: кальцит Calcite	–	0,0	3,0	2,2	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Класс силикатов: группы слюд и гидрослюд (предположительно – мусковит/иллит) Muscovite/illite	–	11,5	13,4	9,8	40,4	34,2	14,0	14,0	7,5	6,8	8,0	8,0
Класс силикатов: группа глинистых минералов: каолинит Kaolinite	–	1,6	1,5	1,1	2,6	1,3	3,5	2,5	1,5	1,0	0,0	0,0
Класс силикатов: группа хлоритов/Chlorite	–	5,3	6,0	2,5	5,5	2,3	8,0	8,2	6,0	2,7	1,0	1,0

Окончание табл. 1.

Table 1.

Показатель/Index	Единицы измерения Units	Пункт отбора проб воды (рис. 1)/Points of water sampling (Fig. 1)										
		M1604	M1603	M1602	M1601	M1605	M1611	M1609	M1608	M1607	M1610	M1606
Геологическая формация* Geological formation	–	Бан Тхи/ Ban Thi				Ченгу Chengu	Дай/ Dai				Намду Namdu	Фодай Pho Dai
		Pia Phuong				Mia Le; Khao Loc	Phu Ngu				Pia Phuong	Phu Ngu
Содержание химических элементов во фракции донных отложений с диаметром частиц <0,5 мм Concentration of elements in the river fraction of bottom sediments with particle diameter <0,5 mm												
Ca	%	0,845	1,957	2,019	1,526	0,846	0,929	0,944	0,954	0,793	0,536	0,503
Na		0,198	0,150	0,110	0,096	0,217	0,059	0,062	0,046	0,105	0,010	0,048
Fe		2,675	5,397	5,214	4,177	3,193	4,889	3,821	2,700	2,329	1,541	1,124
Sm	мг/кг mg/kg	3,178	3,918	3,549	7,412	5,593	6,661	4,053	3,452	3,857	2,567	1,602
Ce		40,36	47,28	39,60	94,65	16,23	88,92	57,17	48,14	58,32	40,36	25,67
Lu		0,224	0,298	0,267	0,491	0,417	0,514	0,295	0,262	0,256	0,144	0,159
U		1,205	1,927	1,224	2,350	2,296	2,895	2,133	1,010	1,384	0,962	0,811
Th		5,651	8,292	6,203	16,171	12,694	16,069	13,284	9,668	10,567	6,944	5,004
Cr		45,45	69,62	61,04	85,27	90,37	94,00	81,73	66,73	62,48	47,98	46,50
Yb		1,761	2,050	2,046	3,725	2,822	3,214	2,160	1,953	2,115	1,093	1,328
Au		0,034	0,044	0,030	0,012	0,003	0,005	0,008	0,003	0,006	0,006	0,011
Hf		4,427	3,344	2,445	5,211	7,139	6,298	5,325	5,860	6,532	4,365	5,208
Ba		154,48	228,68	256,43	550,48	520,47	406,42	302,45	235,01	231,01	143,21	124,06
Sr		17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	26,52	17,50	17,50
Nd		12,18	19,50	20,61	40,97	28,14	38,67	22,83	22,11	23,59	12,37	8,88
As		121,83	294,27	274,81	52,50	22,27	105,06	57,73	32,30	15,25	8,29	2,90
Ag		0,500	7,245	5,619	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500
Br		2,857	6,884	0,250	5,945	0,250	0,250	4,983	2,175	2,698	2,168	1,210
Cs		4,053	6,711	4,117	14,835	12,805	13,709	9,815	6,710	6,271	4,647	2,456
Tb		0,365	0,599	0,387	0,871	0,546	0,847	0,741	0,518	0,457	0,317	0,164
Sc		6,258	8,774	8,217	14,180	11,405	16,060	10,366	7,354	6,997	4,154	3,409
Rb		53,95	82,81	64,85	163,03	152,86	178,76	142,60	108,80	92,63	67,79	52,36
Zn		1491,51	7424,95	8232,14	1070,63	388,07	894,15	690,99	250,78	202,34	238,65	79,20
Ta	0,692	0,480	0,775	0,810	0,958	1,063	0,863	0,595	0,593	0,469	0,373	
Co	9,30	16,31	17,34	18,17	13,15	19,99	13,53	9,92	8,98	6,25	4,19	
Eu	0,606	0,897	0,924	1,418	1,112	1,825	0,721	0,785	0,619	0,356	0,244	
La	20,12	26,55	22,86	49,72	36,81	48,60	27,44	22,44	26,13	20,04	9,73	
Sb	4,224	12,755	10,620	3,722	2,683	5,141	3,237	1,773	1,508	1,885	0,767	

Примечание: * разделение на геологические формации даны по [9]: формация Khao Loc: верхняя субформация ($D_{1-2}kl_1$) – черные известняки, мергели; нижняя субформация ($D_{1-2}kl_2$) – глинисто-серицитовые сланцы, кварцитовидные песчаники с тонкими прослоями известняков; формация Mia Le – верхняя субформация (D_1ml_1) – песчаники, известняки, мергели, переслаивающиеся с глинистыми сланцами и известковистыми филлитами; нижняя субформация (D_1ml_2) – глинистые, мергелистые сланцы, глинистые известняки и аргиллиты; формация Pia Phuong: верхняя субформация (D_{1pp_2}) – серицит-кварцевые сланцы, риолитовые, кварц-альбитовые туфы, мраморы; нижняя субформация (D_{1pp_1}) – глинисто-серицитовые сланцы, черные битуминозные аргиллиты, филлиты, доломитовые известняки и мраморы; формация Phu Ngu: верхняя субформация ($O_3-S_1pn_3$) – кварцевые песчаники, кварциты, с прослоями биотит-андалузит-кордиеритовых сланцев; средняя субформация ($O_3-S_1pn_2$) – черные глинисто-кремнистые сланцы, туфоалевролиты, линзы известняков; нижняя субформация ($O_3-S_1pn_1$) – сланцы, песчаники с тонкими прослоями кремнистых аргиллитов, известковые алевролиты, туфобрекчий.

Note: * the geological formations are divided according to [9]: Khao Loc formation: upper subformation ($D_{1-2}kl_1$) – black limestones, marls; Lower subformation ($D_{1-2}kl_2$) – clay-sericite shales, quartzite sandstones with thin interlayers of limestones; Formation Mia Le – upper subformation (D_1ml_1) – sandstones, limestones, marls interbedded with clay shales and calcareous phyllites; Lower subformation (D_1ml_2) – clay and marl shales, clay limestones and mudstones; Formation Pia Phuong: upper subformation (D_{1pp_2}) – sericite-quartz schists, rhyolite, quartz-albitophyre tuffs, marbles; Lower subformation (D_{1pp_1}) – clay-sericite shales, black bituminous mudstones, phyllites, dolomite limestones and marbles; Phu Ngu formation: upper subformation ($O_3-S_1pn_3$) – quartz sandstones, quartzites, with interlayers of biotite-andalusite-cordierite schists; Middle subformation ($O_3-S_1pn_2$) – black clay-siliceous shales, tuff siltstones, limestone lenses; Lower subformation ($O_3-S_1pn_1$) – shales, sandstones with thin interlayers of siliceous shales, calcareous siltstones, tuffs.

насыщению речных вод относительно кальцита; для водных вытяжек принято $\Delta L=0$, для речных вод $\Delta L=v_a \cdot \tau_{eq}$, где τ_{eq} – время приближения к термодинамическому равновесию; 2) для речных вод ищется значение τ_{eq} , при котором достигается минимум функции (19):

$$f(\eta) = \sqrt{\frac{\sum_L (\eta_{L,w} - \eta_{L,ws})^2}{(N-1)D_{\eta,ws}}}, \quad (19)$$

где $\eta_{L,w}$ и $\eta_{L,ws}$ – индекс насыщения речных вод и водной вытяжки из донных отложений относи-

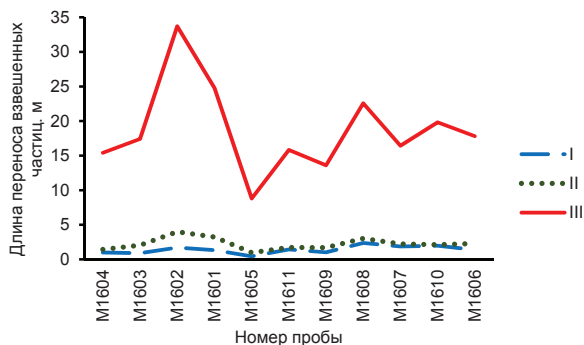


Рис. 2. Ориентировочные значения протяжённости переноса взвешенных частиц в меженьный период в феврале 2016 г. (I), при норме водного стока (II) и максимальном дождевом паводке обеспеченностью 10 % (III)

Fig. 2. Approximate values of extension suspended particle transport in the low flow in February, 2016 (I), at norm of a water discharge (II) and the maximal rain flow with 10 % probability (III)

тельно кальцита на расстоянии L от истока реки; N – количество расчётных створов; $D_{\tau,ws}$ – дисперсия индексов насыщения водных вытяжек.

В результате время τ_{eq} для условий февраля 2016 г. оценено в размере 9,4 часа. С учётом времени переноса взвешенных веществ фактическое время релаксации гидрогеохимической системы к равновесию составляет от 4,2 до 9,4 часа (минимум – разница между $\tau_{eq}=9,4$ часа и временем перемещения взвешенных наносов со средней скоростью v_0). Таким образом, с учётом средней скорости течения равновесие речных вод с кальцитом достигается на расстоянии от 2,5–3,0 км до 10–11 км, что в целом совпадает с выводами, полученными Нгуен Ван Луеном в результате анализа данных наблюдений и использования имитационной математической модели [7].

Заключение

На основе обобщения указанных аспектов формирования геохимического состояния речных вод

Таблица 2. Статистически значимые коэффициенты корреляции между показателями минерального и химического состава фракции донных отложений с диаметром частиц менее 0,5 мм (при уровне значимости 5 %)

Table 2. Statistically significant factors of correlation between parameters of mineral and chemical composition in the fraction of bottom sediments with diameter of particles less than 0,5 mm (for a significance value 5 %)

Химический элемент Element	Содержание в речных водах Concentration in river water	Содержание в водной вытяжке из донных отложений Concentration in water extraction	Содержание серы в водной вытяжке из донных отложений Sulfur concentration in the extraction of water sediments	Кварц Quartz	Плагиоклазы Plagioclase	КПШ Potassium feldspar	Кальцит Calcite	Иллит/Мусковит Illite/Muscovite	Каолинит Kaolinite	Хлорит Chlorite	Средний диаметр взвешенных частиц $D_{0,05}$ Particle diameter	Уклон реки River slope
Ca	0,66	-	-	-	-	-	0,90	-	-	-	-0,55	-
Na	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,62	0,67
Fe	-0,58	-	0,49	-0,51	-	-	0,67	-	0,67	0,58	-0,65	-
Sm	-	-	0,67	-0,89	0,56	0,49	-	0,77	0,80	0,50	-	-
Ce	-	-	0,58	-	-	-	-	-	0,76	0,63	-	-
Lu	0,68	-	0,76	-0,87	0,58	0,61	-	0,72	0,84	0,54	-	-
U	0,70	0,86	0,76	-0,80	0,58	0,61	-	0,63	0,84	0,62	-	-
Th	-	-	0,69	-0,76	-	0,49	-	0,64	0,81	0,58	-	-
Cr	-	-0,75	0,71	-0,77	-	0,60	-	0,64	0,78	0,57	-	-
Yb	0,62	-	0,64	-0,90	0,53	-	-	0,78	0,80	0,49	-	-
Au	-	0,64	-	-	-	-	0,62	-	-	-	-0,57	0,68
Ba	-	-	0,52	-0,92	-	-	-	0,89	0,64	-	-	-
Nd	-	-	0,71	-0,80	-	0,51	-	0,67	0,80	0,51	-	-
As	-	-	-	-	-	-	0,68	-	-	-	-0,61	0,52
Ag	-	0,91	-	-	-	-	0,72	-	-	-	-	-
Br	-	0,53	-	-	-	-	0,56	-	-	-	-	-
Cs	-	0,75	0,66	-0,88	-	0,51	-	0,78	0,78	0,51	-	-
Tb	-	-	0,66	-0,78	-	0,49	-	0,57	0,92	0,79	-	-
Sc	-	-	0,80	-0,83	0,56	0,61	-	0,64	0,90	0,64	-	-
Rb	-	0,63	0,73	-0,77	-	0,57	-	0,65	0,80	0,58	-	-
Zn	-	0,79	-	-	-	-	0,73	-	-	-	-	-
Ta	-	-	0,77	-0,65	0,51	0,50	-	0,52	0,79	0,51	-0,49	-
Co	-	-	0,66	-0,69	-	0,51	0,59	-	0,80	0,60	-	-
Eu	-	-	0,84	-0,75	0,61	0,72	-	0,56	0,85	0,57	-0,49	-
La	-	-	0,72	-0,85	0,57	0,54	-	0,72	0,81	0,50	-	-
Sb	-	-	-	-	-	-	0,74	-	-	-	-0,59	-
S	0,89*	Нет данных	1,00	-	0,51	0,68	-	-	0,91	0,76	-	-

Примечание: * сера сульфат-иона в водной вытяжке.

Note: * sulphur of sulphate ion in water extract.

Таблица 3. Индексы насыщения речных вод (W) и водных вытяжек (E) из донных отложений в междуречье рек Ло и Кау в феврале 2016 г.

Table 3. Indexes of saturation of river waters (W) and water extracts (E) from bottom sediments in the area between the Lo and Kau minor rivers in February, 2016

Номер Number	Реакция Reaction	Компонент Component	Пункт отбора проб воды (рис. 1), длина реки от истока (км) Water sampling point (Fig. 1), the length of the river from the source (km)										
			M1604	M1603	M1602	M1601	M1605	M1611	M1609	M1608	M1607	M1610	M1606
			3,68	7,84	8,99	13,14	7,98	16,12	29,57	32,82	41,68	11,32	32,9
I	$\text{CaCO}_3(\text{calcite}) = \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	W	-0,01	-0,10	0,47	0,05	-0,11	-0,27	0,00	0,03	-0,40	-0,16	-1,52
		E	-8,92	-0,24	-0,39	-8,66	-8,64	-8,51	-8,63	-8,59	-8,78	-9,00	-9,04
II	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2(\text{dolomite}) = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 2\text{CO}_3^{2-}$	W	-0,30	-0,31	0,71	-0,02	-0,27	-0,42	0,14	0,17	-0,63	-0,34	-2,53
		E	-18,23	-0,98	-1,32	-17,88	-17,96	-17,35	-17,56	-17,67	-17,86	-18,48	-18,17
III	$\text{Ca}(\text{ГК}) = \text{Ca}^{2+} + \text{ГК}$	W	1,10	1,08	1,11	1,08	1,04	0,97	0,91	0,92	0,83	1,02	0,45
		E	0,74	0,88	0,90	0,96	0,94	1,21	0,95	0,92	0,82	0,62	0,58
IV	$\text{SiO}_2(\text{quartz}) + 2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_4\text{SiO}_4^0$	W	0,29	0,22	0,22	0,28	0,30	0,42	0,43	0,36	0,43	0,29	0,55
		E	0,04	-0,04	-0,28	0,00	-0,16	0,06	0,11	-0,04	-0,08	-0,10	0,00
V	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{anorthite}) + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{kaolinite})$	W	-18,15	-18,19	-18,04	-18,17	-18,35	-18,77	-19,10	-19,09	-19,51	-18,56	-21,36
		E	-23,96	-22,34	-21,32	-22,84	-21,25	-22,43	-23,35	-22,51	-22,23	-22,08	-22,70
VI	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{anorthite}) + 2\text{H}^+ + 6\text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}(\text{gibbsite}) + \text{Ca}^{2+}$	W	-4,87	-5,15	-4,06	-4,75	-4,98	-4,78	-4,10	-4,19	-4,71	-4,97	-5,81
		E	-5,68	-4,91	-5,58	-5,16	-5,39	-5,48	-5,24	-5,56	-5,65	-5,19	-6,02
VII	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8(\text{albite}) + 7\text{H}_2\text{O} + \text{H}^+ = \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}(\text{gibbsite}) + \text{Na}^+ + 3\text{H}_4\text{SiO}_4^0$	W	-205,08	-205,26	-204,83	-204,89	-204,93	-204,19	-203,80	-204,12	-204,04	-205,06	-204,07
		E	-205,97	-205,85	-206,69	-205,65	-206,16	-205,64	-205,39	-205,90	-205,80	-206,07	-205,83
VIII	$\text{ZnSO}_4(\text{zincite}) = \text{Zn}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$	W	-12,12	-11,35	-11,29	-11,49	-13,24	-10,88	-12,39	-12,72	-12,62	-12,56	-13,46
		E	-16,86	-17,23	-16,91	-16,76	-17,04	-16,16	-16,52	-16,98	-17,30	-17,85	-16,99
IX	$\text{ZnCO}_3(\text{smithsonite}) = \text{Zn}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	W	1,11	1,72	2,23	1,68	-0,01	1,73	0,70	0,53	0,38	0,75	-0,84
		E	-12,35	-4,39	-4,62	-12,86	-13,05	-12,86	-12,67	-12,77	-12,96	-13,06	-12,39

Примечание: отрицательные значения индекса η в уравнении (б) указывают на недосыщение, а положительные – на пересыщение раствора относительно минералов или веществ.

Note: negative values of the index η indicate a lack of saturation, and positive values indicate a supersaturation of the solution with reference to minerals or substances.

и донных отложений можно предположить, что наличие русловой сети, сопряжённой с тектоническими нарушениями (характеризуемое величиной P (r/f)), в целом является индикатором поступления вещества на рассматриваемый участок водосбора (по терминологии авторов работы [28], как при «ближнем», так и при «дальнем» переносе), а соотношение площади водосбора и его части без выраженной русловой сети (F/F_0) – индикатором потенциальной «сохранности» источника химических элементов или «устойчивости» геохимического и/или гидродинамического барьеров, являющихся причиной их долговременной аккумуляции в геосистеме даже при отсутствии явного коренного источника. Причём наилучшие условия для аккумуляции вещества будут характерны для обстановок, в которых при достаточном притоке вещества величина F/F_0 в геологическом времени последовательно уменьшается. В случае существенных колебаний F/F_0 вероятность формирования геохимических аномалий заметно снижается даже в случае интенсивного притока веществ. Соответственно, уменьшается и вероятность

обнаружения крупных месторождений полезных ископаемых, что, впрочем, не исключает возможность обнаружения проявлений или небольших по запасам месторождений. Именно такая ситуация в части распространения небольших месторождений свинцово-цинковых руд характерна и для рассматриваемого района Вьетнама.

Геоэкологические условия разработки месторождений полезных ископаемых в значительной степени определяются наличием карбонатного и, возможно, гуматного барьеров, функционирующие которых, в свою очередь, зависит от гидрологического режима. Роль последнего двойка: в период повышенной водности потенциально увеличивается механическое выветривание и перенос, в период пониженной водности – химическое. Комплексное воздействие гидрологических факторов в рассматриваемом районе проявляется в среднем на участках протяжённости около 3–5 км, максимально – до 10–11 км.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-05-00042.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Improved method for hydrochemical exploration of mineral resources / Nguyen Van Luyen, O.G. Savichev, V.A. Domarenko, Quach Duc Tin // Vietnam Journal of Earth Sciences. – 2017. – № 39 (2). – P. 167–180. DOI: 10.15625/0866-7187/39/2/9703.
2. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth // Geochemistry International. – 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
3. Домаренко В.А. Рациональная методика поисков и геолого-экономической оценки месторождений руд редких и радиоактивных элементов. – В 2-х ч. Ч. I. Прогнозирование. Поиски и оценка. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2012. – 167 с.
4. Копылова Ю.Г., Гусева Н.В. Гидрогеохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2014. – 184 с.
5. Способ выделения геохимических аномалий на основе анализа химического состава речных отложений: пат. № 2548608, Российская Федерация, С2.; заявл. 26.07.2013; опубл. 20.04.2015, Бюл. № 11. – 8 с.
6. Савичев О.Г., Решетько М.В., Моисеева Ю.А. Методика реконструкции зонального водного стока в Западной Сибири в голоцене // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 5. – С. 87–96.
7. Нгуен Ван Луен. Эколого-геохимическое состояние подземных и речных вод, донных отложений водотоков в северной части Вьетнама (на примере уезда Чодонь, провинция Баккан): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2017. – 22 с.
8. Дао Мань Тиен. Методология и особенности геохимической специализации гранитоидных формаций Северного Вьетнама: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Баку, 1984. – 198 с.
9. Нгуен Кинг Куок. Карта геологических условий и минеральных ресурсов в масштабе 1:200000. Лист – провинция Баккан F48-XV. – Ханой: Главное управление геологии и полезных ископаемых Вьетнама, 2001. / на вьетнам. яз.
10. Chemical characteristics of Pb-Zn ores and their tailings in the northern Vietnam / S. Ishihara, P. Dung, P.N. Can, T.A. Tran // Shigen-Chishitsu. – 2012. – V. 62. – № 1. – P. 27–34. DOI: <http://doi.org/10.11456/shigenchishitsu.62.27>.
11. Савичев О.Г., Нгуен В.Л. Гидроэкологическое состояние междуречья рек Гам и Кау (Северный Вьетнам) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 7. – С. 96–103.
12. Савичев О.Г., Колоколова О.В., Жуковская Е.А. Состав и равновесие донных отложений р. Томь с речными водами // Геоэкология. – 2003. – № 2. – С. 108–119.
13. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part I – A discussion of principles // Journal of Hydrology. – 1970. – № 10 (3). – P. 282–290.
14. Sources, speciation and transformation of arsenic in the gold mining impacted Jiehe River, China / Y. Cai, H. Zhang, G. Yuan, F. Li // Applied Geochemistry. – 2017. – № 84. – P. 254–261. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.07.001>.
15. Evaluation of arsenic sorption and mobility in stream sediment and hot spring deposit in three drainages of the Tibetan Plateau / Y. Zhang, S. Li, L. Zheng, J. Chen, Y. Zheng // Applied Geochemistry. – 2017. – V. 77. – P. 89–101. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.04.006>.
16. Using total suspended solids (TSS) and turbidity as proxies for evaluation of metal transport in river water / T. Nasrabadi, H. Ruegner, Z.Z. Sirdari, M. Schwientek, P. Grathwohl // Applied Geochemistry. – 2016. – V. 68. – P. 1–9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.03.003>.
17. Караушев А.В. Речная гидравлика. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 416 с.
18. Hendricks M.R. Introduction to Physical Hydrology. – New York: Oxford University Press Inc., 2010. – 331 p.
19. Mujumdar P.P., Kumar D.N. Floods in a Changing Climate // Hydrologic Modeling. – New York, USA: Cambridge University Press, 2012. – 177 p.
20. Гришанин К.В. Устойчивость речных русел и кинематические волны // Труды Государственного гидрологического института. Вып. 190. Исследования морфологии и гидравлики речных русел, пойм и водоёмов для нужд строительного проектирования. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – С. 37–56.
21. Banwart S.A. Aqueous Speciation at the Interface between Geological Solids and Groundwater // Modelling in Aquatic Chemistry / Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. – Paris, France: OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. – P. 245–288.
22. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. – М.: Высш. шк., 1975. – 341 с.
23. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: Наука, 2004. – 677 с.
24. White W.M. Geochemistry. – Ithaca, New York, USA: John Wiley&Sons, Ltd, Cornell University, 2013. – 660 p.
25. Ephraim J.H., Allard B. Metal Ion Binding by Humic Substances // Modelling in Aquatic Chemistry / Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. – Paris, France: OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. – P. 207–244.
26. Chemical immobilization of metals and metalloids by phosphates / E.G. Hafsteinsdottir, D. Camenzuli, A.L. Rocavert, J. Walworth, D.B. Gore // Applied Geochemistry. – 2015. – V. 59. – P. 47–62. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.03.014>.
27. Dynamic interplay between uranyl phosphate precipitation, sorption, and phase evolution / P. Sumudu Munasinghe, M.E. Elwood Madden, S.C. Brooks, A.S. Elwood Madden // Applied Geochemistry. – 2015. – V. 58. – P. 147–160. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.04.008>.
28. Россыпные месторождения России и других стран СНГ (мирагенез, промышленные типы, стратегия развития минерально-сырьевой базы) / Н.Г. Патык-Кара, Б.И. Беневольский, Л.З. Быховский, Л.Б. Зубков, А.А. Кременецкий, Е.В. Матвеева, В.А. Мелкий, В.Е. Минорин, А.Г. Мочалов, Н.М. Риндзюнская, Б.В. Рыжов, Л.В. Спорыхина, Е.А. Черемисина / отв. ред. Н.П. Лавёров, Н.Г. Патык-Кара. – М.: Научный мир, 1997. – 479 с.

Поступила 18.08.2017 г.

Информация об авторах

Савичев О.Г., доктор географических наук, профессор кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Томского политехнического университета.

Домаренко В.А., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Томского политехнического университета.

Перегудина Е.В., аспирант кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Томского политехнического университета.

Нгуен Ван Луен, научный сотрудник, Институт геологии и минеральных ресурсов.

Шалдыбин М.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Томского политехнического университета.

Канаки А.В., кандидат физико-математических наук, инженер кафедры прочности и проектирования Физико-технического факультета Томского государственного университета.

UDC 556.06:551.482.212

MINERAL-GEOCHEMICAL FEATURES OF THE MINOR RIVER SEDIMENTS IN THE INTERFLUVE AREA OF THE LO AND KAU RIVERS (NORTHERN VIETNAM)

Oleg G. Savichev¹,
OSavichev@mail.ru

Viktor A. Domarenko¹,
viktor_domarenko@mail.ru

Elena V. Peregudina¹,
pere-elena@mail.ru

Nguyen Van Luyen²,
Luyennv@yahoo.com

Michail V. Shaldybin¹,
ShaldybinMV@tpu.ru

Aleksey V. Kanaki³,
KanakiA@mail.ru

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

² Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resources,
67, Chien Thang, Thanh Xuan, Ha Noi, 100000, Vietnam.

³ Tomsk State University,
36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. Investigations of mineral and chemical composition of river sediments have great meaning in development and improvement of techniques of hydrogeochemical study of minerals and decisions of tasks for normalization of anthropogenous influence on surface and ground water objects.

The aim of the research is to estimate mineral and chemical composition in river bottom sediments of the area between the Lo and Kau rivers (Northern Vietnam) as causes and effects of formation of geochemical anomalies in water objects.

Methods of the research: mathematical modelling, landscape-geochemical and statistical methods, methods of definition of chemical and mineral composition of river bottom sediments.

Results and conclusions. The data on mineral and chemical composition of the Ban Thi, Dai rivers and their tributaries sediments were obtained. The authors have analyzed the interrelations between mineral and chemical composition of river bottom sediments, water extracts from them and river waters. It is shown that concentrations of some chemical elements find the direct ratio to the contents of chlorite and in inverse proportion to the contents of quartz. It is ascertained that carbonate barrier plays the important role in regulation of chemical composition of river waters in the affected area of mining plants associated with the extraction of lead-zinc ores. The authors obtained the approximate estimations of hard sediment particles transport distance (up to 34 km at rain period) and the average time of approximation to saturation of river waters relative to calcite (approximately 9,4 h). The conclusion on the key role of geochemical barriers in formation of geocological conditions of ore extractions, including decrease of zinc, lead and some other elements concentration in river waters and sediments on the distance up to 10–11 km is proved.

Key words:

Northern Vietnam, river sediments, mineral and chemical composition, minor rivers, geochemical anomalies.

The research was financially supported by the RFBR grant no. 17-05-00042.

REFERENCES

1. Nguyen Van Luyen, Oleg G. Savichev, Viktor A. Domarenko, Quach Duc Tin. Improved method for hydrochemical exploration of mineral resources. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 2017, no. 39 (2), pp. 167–180. DOI: 10.15625/0866-7187/39/2/9703.
2. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
3. Domarenko V.A. *Ratsionalnaya metodika poiskov i geologo-ekonomicheskoy otsenki mestorozhdeniy rud redkikh i radioaktivnykh elementov. Ch. I. Prognozirovanie i otsenka* [Rational methodology of prospecting and geological and economic evaluation of ore deposits of rare and radioactive elements. P. I. Forecasting. Searches and evaluation]. Tomsk, Tomsk Polytechnic university Publ. house, 2012. 167 p.
4. Kopylova Yu.G., Guseva N.V. *Gidrogeokhimicheskie metody poiskov mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Hydrogeochemical methods of searching ore deposits]. Tomsk, Tomsk Polytechnic university Publ. house, 2014. 184 p.
5. Savichev O.G., Domarenko V.A., Reshetko M.V. *Sposob vydeleniya geokhimicheskikh anomaly na osnove analiza khimicheskogo sostava rechnykh otlozheniy* [Method of allocation of geochemical

- anomalies on the basis of the analysis of a chemical composition of river sediments]. Patent RF, no. 2548608, 2015.
6. Savichev O.G., Reshetko M.V., Moiseeva Yu.A. Methods of reconstruction of a zonal runoff in western Siberia in Holocene. *Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 5, pp. 87–96. In Rus.
 7. Nguen Van Luen. *Ekologo-geohimicheskoe sostoyanie podzemnykh i rechnykh vod, donnykh otlozheny vodotokov v severnoy chasti Vietnama (na primere uezda Chodon, provintsiya Bakkan)*. Dis. Kand. nauk [Ecological and geochemical condition of ground and river waters, river sediments of the minor rivers in the Northern part of Vietnam (by the example of Chodon district, Baccan province). Cand. Diss.]. Tomsk, 2017. 22 p.
 8. Dao Man Tien. *Metodologiya i osobennosti geokhimicheskoy spetsializatsii granitoidnykh formatsiy Severnogo Vietnama*. Dis. Kand. nauk [Methodology and features of geochemical specialization of granite formations of Northern Vietnam. Cand. Diss.]. Baku, 1984. 198 p.
 9. Nguyen Kinh Quoc. The Map of geological conditions and mineral resources in scale 1:200000 of Bac Kan province, sheet F48-XV. Hanoi, General Department of Geology and Minerals of Vietnam, 2001. In Vietnamese.
 10. Ishihara S., Dung P., Can P.N., Tran T.A. Chemical characteristics of Pb-Zn ores and their tailings in the northern Vietnam. *Shigen-Chishitsu*, 2012, vol. 62, no. 1, pp. 27–34. DOI: <http://doi.org/10.11456/shigenchishitsu.62.27>.
 11. Savichev O.G., Nguyen Van Luyen. Hydroecological condition between the Gam and Kau rivers (Northern Vietnam). *Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 7, pp. 96–103. In Rus.
 12. Savichev O.G., Kolokolova O.V., Zhukovskaya E.A. Sostav i ravnovesie donnykh otlozheniy r. Tom s rechnymi vodami [Composition and balance of river sediments of the Tom river with river waters]. *Geokologiya – Geoecology*, 2003, no. 2, pp. 108–119.
 13. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual mod-els. Part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, no. 10 (3), pp. 282–290.
 14. Cai Y., Zhang H., Yuan G., Li F. Sources, speciation and transformation of arsenic in the gold mining impacted Jiehe River, China. *Applied Geochemistry*, 2017, no. 84, pp. 254–261. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.07.001>.
 15. Zhang Y., Li S., Zheng L., Chen J., Zheng Y. Evaluation of arsenic sorption and mobility in stream sediment and hot spring deposit in three drainages of the Tibetan Plateau. *Applied Geochemistry*, 2017, vol. 77, pp. 89–101. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.04.006>.
 16. Nasrabadi T., Ruegner H., Sirdari Z.Z., Schwientek M., Grathwohl P. Using total suspended solids (TSS) and turbidity as proxies for evaluation of metal transport in river water. *Applied Geochemistry*, 2016, vol. 68, pp. 1–9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.03.003>.
 17. Karaushev A.V. *Rechnaya gidravlika* [River hydraulics]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1969. 416 p.
 18. Hendricks M.R. *Introduction to Physical Hydrology*. New York, Oxford University Press Inc., 2010. 331 p.
 19. Mujumdar P.P., Kumar D.N. *Floods in a Changing Climate. Hydrologic Modeling*. New York, USA, Cambridge University Press, 2012. 177 p.
 20. Grishanin K.V. *Ustoychivost rechnykh rusel i kineticheskie volny* [Stability of river channels and kinematic waves]. *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta. Vypusk 190. Issledovanie morfologii i gidravliki rechnykh rusel, poym i vodoemov dlya nuzhd stroitel'nogo proektirovaniya* [Materials of the State hydrological institute. Iss. 190. Researches of morphology and hydraulics of river channel, flood plain and reservoirs for needs of building designing]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972. pp. 37–56.
 21. Banwart S.A. *Aqueous Speciation at the Interface between Geological Solids and Groundwater. Modelling in Aquatic Chemistry*. Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. Paris, France, OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. pp. 245–288.
 22. Perelman A.I. *Geokhimiya landshaftov* [Geochemistry of the landscape]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1975. 341 p.
 23. Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod: teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of ground waters: theoretical, applied and environmental aspects]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 677 p.
 24. White W.M. *Geochemistry*. Ithaca, New York, USA, John Wiley&Sons, Ltd, Cornell University, 2013. 660 p.
 25. Ephraim J.H., Allard B. Metal Ion Binding by Humic Substances. *Modelling in Aquatic Chemistry*. Eds. I. Grenthe and I. Puigdomenech. Paris, France, OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. pp. 207–244.
 26. Hafsteinsdottir E.G., Camenzuli D., Rocavert A.L., Walworth J., Gore D.B. Chemical immobilization of metals and metalloids by phosphates. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 59, pp. 47–62. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.03.014>.
 27. Sumudu Munasinghe P., Elwood Madden M.E., Brooks S.C., Elwood Madden A.S. Dynamic interplay between uranyl phosphate precipitation, sorption, and phase evolution. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 58, pp. 147–160. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.04.008>.
 28. Patyk-Kara N.G., Benevolsky B.I., Byhlovsky L.Z., Zubkov L.B., Kremenetsky A.A., Matveev E.V., Melky V.A., Minorin B.E., Mochalov A.G., Ridzyunskaya N.M., Ryzhov B.V., Sporykhina L.V., Cheremisina E.A. *Rosyppnye mestorozhdeniya Rossii i drugikh stran SNG (minerageniya, promyshlennyye tipy, strategiya razvitiya mineralno-syrevooy bazy)* [Placer deposits of Russia and other CIS countries (Minerageny of places, geological and commercial types and development of raw materials base)]. Eds. N.P. Laverov, N.G. Patyk-Kara. Moscow, Nauchny mir Publ., 1997. 479 p.

Received: 18 August 2017.

Information about the authors

Oleg G. Savichev, Dr. Sc., professor, Tomsk Polytechnic University.

Viktor A. Domarenko, Cand. Sc., associate professor, Tomsk Polytechnic University.

Elena V. Peregudina, post-graduate student, Tomsk Polytechnic University.

Nguyen Van Luyen, scientific employee, Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resources.

Michail V. Shaldybin, Cand. Sc., associate professor, Tomsk Polytechnic University.

Aleksey V. Kanaki, Cand. Sc., engineer, Tomsk State University.

УДК 553.242.4:553.444

ОКОЛОРУДНЫЕ МЕТАСОМАТИТЫ БАРИТ-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗМЕИНОГОРСКОГО РУДНОГО РАЙОНА (РУДНЫЙ АЛТАЙ)

Бестемьянова Ксения Викторовна¹,
KsenijaVT@mail.ru

Гринев Олег Михайлович¹,
tomskgrom@yandex.ru

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

Актуальность работы обусловлена необходимостью поиска новых скрытых объектов барит-полиметаллических руд в северо-западной части Рудноалтайского региона в связи с истощением минеральных ресурсов района. Околорудноизмененные породы неотъемлемо сопровождают оруденение, в связи с этим их выявление и детальное изучение позволит в определенной степени прогнозировать наличие скрытого полиметаллического оруденения в пределах Змеиногорского рудного района.

Цель работы: выявление петрографических, минералогических и некоторых генетических характеристик околорудноизмененных пород Зареченского и Стрижковского барит-полиметаллических месторождений северо-западной части Змеиногорского рудного района (Рудный Алтай).

Методы исследования. Проведено комплексное исследование околорудноизмененных пород, включающее характеристику нерудной и рудной минерализации в поляризационном микроскопе, а также исследование пород и минералов рентгеновским энерго-дисперсионным микроанализом, рентгенолюминесцентным, рентгенофлуоресцентным (РФА), атомно-абсорбционным анализами.

Результаты. Изученные околорудноизмененные породы Зареченского и Стрижковского барит-полиметаллических месторождений имеют схожий минеральный состав и относятся к бескарбонатной фации березитов. Главными породообразующими минералами изученных пород являются кварц, хлорит, серицит; второстепенными – пирит, а также в малом количестве, преимущественно в виде прожилков, присутствуют сульфиды непосредственно рудного этапа (сфалерит, галенит, халькопирит); редкими минералами околорудных пород являются апатит, циркон, рутил, также установлено наличие редкоземельной минерализации.

Выявлены некоторые типоморфные особенности основных, второстепенных и редких минералов. Установлено наличие трех генераций кварца в исследуемых породах, выявлены центры свечения для кварца I в диапазоне 320...340 нм, 600...620 нм, для кварца II – 280...300 нм. Хлорит изученных пород, относящийся к ряду клинохлор – пеннин, был использован в качестве природного геотермометра для определения примерного температурного интервала формирования изучаемых околорудных пород, расчетная температура образования которого составила для Зареченского месторождения – 210...240 °С, для Стрижковского месторождения – 220...230 °С. Промышленных содержаний золота и серебра в изученных породах не выявлено.

Ключевые слова:

Околорудноизмененные породы, метасоматиты, минеральный парагенезис, барит-полиметаллическое оруденение, Рудный Алтай.

Введение

Для изучения петрографических и минералогических характеристик околорудноизмененных пород были отобраны штучные образцы двух барит-полиметаллических месторождений – Зареченского и Стрижковского, находящихся в северо-западной части Змеиногорского рудного района. Змеиногорский рудный район входит в состав северо-западной российской части Рудного Алтая и является старейшим горнорудным районом России, имеющим почти трехсотлетнюю историю исследования и освоения. Район крайне богат минеральными ресурсами, большая часть которых приходится на полиметаллические руды, преимущественно Cu, Pb, Zn, соотношение которых определяется как 1:4:7 [1].

В Змеиногорском рудном районе находятся месторождения сразу двух субформаций – колчеданно-полиметаллической и барит-полиметаллической. Месторождения данных субформаций залегают в нескольких различных геологических условиях (даже в пределах одной субформации) и име-

ют определенные отличия в минеральном составе. По запасам основных компонентов (Cu, Pb, Zn) преобладает колчеданно-полиметаллическая субформация, а по минеральному разнообразию и по содержанию благородных металлов (золота и серебра) – барит-полиметаллическая [2].

С 2011 г. в Змеиногорском рудном районе началась активная разработка одного из крупнейших месторождений Рудного Алтая – Корбалихинского колчеданно-полиметаллического месторождения, в связи с чем к данному объекту было приковано внимание многих российских исследователей. В настоящее время месторождение довольно детально исследовано, в том числе изучены его околорудноизмененные породы, которые имеют разнообразный минеральный состав и невыдержанное распространение в пространстве. Их ассоциативный ряд и распределение по разрезу рассмотрены в работе [3].

Околорудноизмененные породы барит-полиметаллических месторождений, напротив, оставались до недавнего времени слабо изученными, хо-

тя играют немаловажную генетическую роль в рудном процессе, а также являются одним из поисковых признаков, указывающих на наличие скрытого оруденения.

Геологическая характеристика исследуемых объектов

Змеиногорский рудный район (рис. 1) располагается в северо-западной части Рудноалтайского мегапрогиба, который в ряде работ рассматривается в ранге структурно-фациальной зоны (СФЗ) и характеризуется длительной историей развития и сложным геологическим строением. В региональном плане Рудноалтайский мегапрогиб граничит на юго-западе с Иртышской зоной смятия, отделяясь от нее Иртышско-Маркакольским глубинным разломом, а на северо-востоке – с Северо-Восточной зоной смятия, отделяясь от нее Локтевско-Маркакольским глубинным разломом. В свою очередь Иртышская зона смятия с запада обрамляется Калба-Нарымской СФЗ карбоновых черных сланцев, принадлежавших герцинской Обь-Зайсанской складчатой области и прорванных средне-, верхнепалеозойскими гранитоидами Калбинского батолитового пояса.

Северо-Восточная зона смятия с востока обрамляется СФЗ поздних каледонид Горного Алтая, представленных горноалтайской зеленосланцевой серией, а также динамометаморфитами байкалид Теректинского горста.

Структурный план Рудноалтайского мегапрогиба определяется обрамляющими его наиболее древними северо-западными разломными зонами линейного типа, к которым приурочены прибортовые девонские прогибы, ограничивающие мегапрогиб и зоны смятия. Внутренняя структура мегапрогиба предопределена совокупностью северо-западных линейных элементов и сопряженными с ними субмеридиональными нарушениями, расположенными примерно на равных расстояниях друг от друга. К последним разломам приурочены длинные структурные оси основных антиклинориев и синклинориев мегапрогиба (Алейского, Синушкинского, Быструшинского, Белоубинского). Субмеридиональные разломы имеют S-образные очертания и по совокупности данных имеют каледонский возраст заложения, отвечающий этапу формирования догерцинского позднекаледонского зеленосланцевого основания мегапрогиба. В совокупности обрамляющие северо-западные и внутренние субмеридиональные разломы определяют левосдвиговое дуплексное строение не только додевонского цоколя, но и основных герцинских морфоструктур мегапрогиба (антиклинориев и синклинориев), что подтверждается их сопряженным характером, приуроченностью к ним основных зон динамометаморфизма и S-образной геометрией субмеридиональных зон [4].

Прибортовые девонские вулканогенно-терригенные депрессионные зоны мегапрогиба разделе-

ны субмеридиональными разломами на ряд сегментов, соответствующих частным прогибам депрессионных зон – Змеиногорско-Быструшинскому, Золотушинскому и другим. На эти структуры наложены прямолинейные субширотные и северо-восточные разломы, развитые по типу регматической сети. Они заложены на герцинском этапе формирования мегапрогиба и получили подновление в неотектонический этап. Развитие этих прямолинейных разломов, по мнению Ю.А. Туркина [5], определяет правосдвиговое дуплексное строение ряда морфоструктур мегапрогиба, формировавшихся в позднем девоне – карбоне.

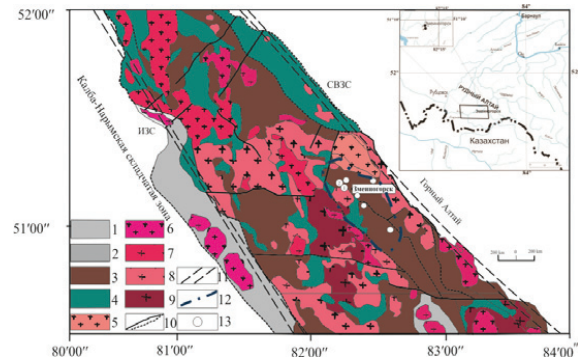


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Рудноалтайского мегапрогиба: 1 – осадочные отложения бухтарминской свиты (C_1); 2 – метаморфические комплексы Иртышской складчатой зоны; 3 – вулканогенно-осадочные отложения девона (мельничная, сосновская, заводская, каменевская свиты) D_1 – D_{2-3} ; 4 – метаморфизованные отложения Корбалихинской толщи (P_2); 5 – Синушкинский гранодиорит-гранит-лейкогранитовый комплекс (P_1 – T_2); 6 – синктонические плагиограниты Иртышской складчатой зоны (C_3 – P_1); 7 – Гилевский, Волчихинский габбро-тоналит-гранитовый комплексы (C_{2-3}); 8 – Змеиногорский габбро-плагиогранит-лейкогранитовый комплекс (D_3); 9 – Алейский габбро-плагиогранитовый комплекс (D_1); 10 – разрывные нарушения; 11 – зоны смятия: СВЗС (Северо-восточная) и ИЗС (Иртышская); 12 – границы Змеиногорского рудного района; 13 – месторождения колчеданно-полиметаллической и барит-полиметаллической субформаций, располагающиеся в Змеиногорском рудном районе; непосредственно объекты изучения 1 – Зареченское месторождения, 2 – Стрижковское месторождение

Fig. 1. Schematic geological map of the Rudnoaltaiskii megatrough: 1 – sediments of bukhtarminskaya suite (C_1); 2 – metamorphic complexes of the Irtysh folded area; 3 – Devonian volcanic-sedimentary rocks (melnichnaya, sovnovskaya, zavodskaya, kamenevskaya suits) D_1 – D_{2-3} ; 4 – metamorphosed rocks of Korbalikhinskaya series (P_2); 5 – Sinukhinski granodiorite-granite-leucogranite complex (P_1 – T_2); 6 – syntectonic plagiogranites of Irtysh folded area (C_3 – P_1); 7 – Gilevsk, Volchikhensk gabbro-tonalite-granite complexes (C_{2-3}); 8 – Zmeinogorsk gabbro-plagiogranite-leucogranites complex (D_3); 9 – Aleyski gabbro-plagiogranites complex (D_1); 10 – faults; 11 – folded areas: СВЗС (North-east), ИЗС (Irtysh); 12 – boundaries of Zmeinogorsk ore district; 13 – deposits of pyritic-polymetallic and barite-polymetallic subformation, located at Zmeinogorsk ore district; objects of the study 1 – Zarechensk deposit; 2 – Strizhkovsk deposit

Змеиногорский рудный район располагается в северо-западной части Змеиногорско-Быструшинского прибортового прогиба. В геологическом строении прогиба, как и в геологическом строении рудных полей изученных месторождений, принимают участие отложения двух структурных этажей – позднекаледонского и герцинского. При этом позднекаледонский структурный этаж представлен метаморфитами корбалихинской свиты, имеющей по разным оценкам возраст либо нижнепалеозойский (O–S) [6], либо среднепалеозойский S_2 – D_1 [7]. Герцинский структурный этаж, в пределах Змеиногорско-Быструшинского прогиба, представлен вулканогенно-терригенными нижне-, среднедевонскими отложениями мельничной ($D_{1-2}mn$) и сосновской (D_{2ss}) свит.

Стратифицированные стратоны рудных полей изученных месторождений кратко характеризуются следующим образом.

Корбалихинская свита (Pz_1) представлена ассоциацией неравномерно метаморфизованных осадочных образований зеленосланцевой фации, представленных кварц-серицит-хлоритовыми, кварц-хлоритовыми, кварц-эпидот-хлоритовыми, кварц-карбонатными, глинисто-хлоритовыми сланцами, метапесчаниками. Данные породы интенсивно дислоцированы и смяты в напряженные разномасштабные складки и пронизаны сетью маломощных кварцевых жил и прожилков, пересекающихся в пространстве по типу альпийских жил.

Девонская система, нижний–средний отделы, эмский–живетский ярусы.

Мельничная свита ($D_{1-2} ml$). Свита сложена серыми, зелено-серыми, реже красноцветными полимиктовыми и известковистыми алевролитами, глинистыми сланцами, разнозернистыми песчаниками, реже кремнистыми алевролитами, отдельными линзовидными горизонтами органогенных, органогенно-обломочных и глинистых известняков. Относительно широко развиты вулканические породы, представленные преимущественно вулканокластическими и вулканосадочными отложениями, реже наблюдаются лавовые образования кислого, среднего и основного состава. Свита трансгрессивно с угловым несогласием и базальными конгломератами в основании залегает на породах корбалихинской толщи и несогласно перекрывается кислыми вулканитами сосновской свиты.

Сосновская свита (D_{2ss}) представлена зеленовато- и буровато-серыми лавами, лавобрекчиями, игнимбритами, туфами, тефроидами риолитов, риодацитов, редко базальтов и андезибазальтов, линзами и прослоями алевролитов, известковистых и кремнистых аргиллитов, туфопесчаников, песчаников.

В пределах рудных полей месторождений руды имеют два типа рудных тел: секущие вмещающие толщи, а также штокверки и субпластовые залежи. Рудовмещающей толщей, как для Зареченского, так и для Стрижковского месторождений, является мельничная свита, главным образом

ее нижняя подсвита, где в основном прожилковое и вкрапленное оруденение приурочено к нижнему туфовому горизонту, а массивные и сплошные руды – к верхнему туфовому горизонту, либо к терригенно – карбонатной пачке. В верхнемельничной подсвите объем оруденения существенно уменьшается и встречается в основном в ее нижней части. Незначительный объем оруденения (преимущественно вкрапленная медная руда) встречается и в нижнепалеозойской толще [8]. Рудные тела месторождений сопровождаются околорудноизмененными породами, принимающими непосредственное участие в структурах рудных полей рассматриваемых месторождений.

Методы исследования

Характеристика нерудной и рудной минерализации в прозрачных шлифах и аншлифах в околорудноизмененных породах проводилась на поляризационном микроскопе Leica DM 2500P (К.В. Бестемьянова).

Анализ вещественного состава рудных и нерудных минералов, а также качественные изображения характера взаимоотношения минеральных ассоциаций и минеральных индивидов в режиме обратно рассеянных электронов (режим BSE) проводился методом рентгеноспектрального микроанализа на электронном сканирующем микроскопе Tescan Vega II LMU, оборудованном энергодисперсионным спектрометром (с детектором Si (Li) Standart) INCA Energy 350 (аналитик К.В. Бестемьянова). Для этого из отобранных образцов околорудноизмененных пород были изготовлены плоскопараллельные аншлифы толщиной 3...4 мм. Перед проведением аналитических работ на поверхность изучаемых образцов предварительно напылялся слой углерода толщиной 25...30 нм, по рекомендуемым методикам [9, 10].

Рентгенолюминесценция кварца изученных пород проводилась с помощью установки, собранной на базе монохроматора МДР-12 с компьютерным управлением. Источником возбуждения служила рентгеновская трубка БСВ-2 от аппарата УРС-55 с Мо-антикатодом. Спектральная область от 200 до 900 нм охватывалась благодаря использованию ФЭУ-100 и сменных дифракционных решеток с рабочими областями в диапазонах 200...500 и 350...1000 нм [11] (аналитики Н.Н. Борозновская, А.П. Корнева). Изучение минералов на растровом электронном микроскопе, а также рентгенолюминесценция образцов кварца выполнены в аналитическом центре коллективного пользования «Геохимия природных систем» НИ ТГУ (ЦКП «АЦГПС»), г. Томск.

Химический состав пород (оксидная форма компонентов) определялся рентгенофлуоресцентным методом на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL-9900 XL (аналитик Н.Г. Карманова).

Содержания золота и серебра в околорудноизмененных породах определялись атомно-абсорбционным методом (аналитик В.Н. Ильина)

на атомно-абсорбционном спектрофотометре Solar M6 (чувствительность анализа $1 \cdot 10^{-8}$ мас. %). Рентгенофлуоресцентный и атомно-абсорбционный анализ выполнены в аналитическом центре института Геологии и Минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской Академии наук (г. Новосибирск).

Общая характеристика околорудноизмененных пород

Кварц-хлорит-серицитовые, кварц-хлоритовые и кварц-серицитовые метасоматиты – породы светло-серые, иногда белесые с отдельными участками темно-зеленого цвета (за счет присутствия пластинчатых агрегатов хлорита темно-зеленого цвета) с порфириобластовой, гранобластовой, лепидогранобластовой, неравномернозернистой (гетеробластовой) структурами; массивной и вкрапленной, местами прожилковой текстурами. Изученные породы имеют несколько неравномерное распределение в околорудном пространстве, мощность их развития варьирует от 20 до 150 м. Характер распределения данных пород контролировался положением зон развития трещиноватости и расланцевания вмещающих нижнедевонских пород.

Ореол метасоматического изменения вмещающих пород распространяется на 70...100 м в стороны от рудных тел на Зареченском месторождении [12] и на 80...120 м на Стрижковском. При этом минеральный парагенезис метасоматических пород в значительной мере зависит от исходных вмещающих пород. Так, например, породы, образованные по кислым и основным вулканитам (преимущественно туфам кислого, реже основного состава), а также по тонкозернистым терригенным породам, содержат кварц, серицит, хлорит. Метасоматиты, образованные преимущественно по песчаникам и кремнистым породам, представляют собой микрокварциты, в которых основным минералом является кварц, при этом существенно снижается доля серицита, а хлорит исчезает полностью. Химический состав изученных пород представлен в табл. 1. Основными петрогенными окислами изученных пород являются SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O и в меньшей степени Fe_2O_3 , MgO .

При слабой степени гидротермального изменения (как правило, такие породы встречаются во внешних зонах метасоматического ореола) сохраняются весьма редкие реликты породообразующих минералов (калиевого полевого шпата, реже плагиоклаза), а также реликтовые микроструктуры замещаемых исходных пород (кристаллокластическая и порфирировая), редко можно наблюдать флюидалность, весьма характерную для исходных вулканитов.

Главными породообразующими минералами изученных околорудных метасоматитов являются: кварц, хлорит, серицит; второстепенными – пирит, редкими – халькопирит, галенит, сфалерит; аксессуарными – рутил, апатит, циркон,

а также отмечается присутствие редкоземельной минерализации (монацит и ксенотим).

Таблица 1. Химический состав околорудноизмененных пород Стрижковского и Зареченского месторождений по данным РФА (мас. %)

Table 1. Chemical composition of the wallrock-altered rocks of Strizhkovsk and Zarechensk deposit according to XRF (wt. %)

Компонент Component	Номер пробы Sample number									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO_2	77,4	77,6	81,0	81,3	71,3	71,2	46,0	78,3	45,7	45,9
TiO_2	0,20	0,19	0,10	0,11	0,16	0,28	0,11	0,17	0,10	0,11
Al_2O_3	12,57	12,88	6,96	10,02	11,92	13,50	8,83	11,08	8,90	8,89
Fe_2O_3^*	2,49	2,52	6,98	4,01	4,28	3,17	24,17	2,81	24,24	24,52
MnO	0,02	0,02	0,09	0,04	0,11	0,12	0,08	0,01	0,09	0,09
MgO	0,59	0,65	2,20	0,34	6,21	3,24	3,38	0,83	3,41	3,42
CaO	0,13	0,12	0,12	0,07	0,12	0,14	0,16	0,14	0,15	0,17
Na_2O	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,09	0,06	<0,1	0,05	0,06
K_2O	3,91	3,85	1,53	2,93	1,78	4,11	4,91	3,33	4,82	4,94
P_2O_5	0,05	0,05	0,03	0,02	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03
BaO	0,11	0,13	0,04	0,07	0,13	0,17	0,64	0,12	0,69	0,65
SO_3	0,19	0,18	0,21	0,09	0,50	0,37	0,31	0,23	0,37	0,34
V_2O_5	0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,01	0,01
Cr_2O_3	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
NiO	0,02	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,01	<0,01	<0,01
Сум- maSum	99,61	100,21	100,05	100,54	99,84	99,42	100,24	99,61	99,78	100,52

*все железо как Fe_2O_3 /all ferrum is as Fe_2O_3

Примечание: 1–5 – образцы околорудноизмененных пород Стрижковского месторождения; 6–10 – образцы околорудноизмененных пород Зареченского месторождения.

Note: 1–5 are the samples of wallrock-altered rocks from Strizhkovsk deposit; 6–10 are the samples of wallrock-altered rocks from Zarechensk deposit.

По результатам исследования содержаний благородных металлов в изученных околорудноизмененных породах, а именно вариаций содержаний золота и серебра, установлено, что изучаемые породы не представляют практического интереса, так как имеют низкие содержания этих металлов. Так, в кварц-серицитовых породах содержания золота варьируют в пределах 0,02...0,10 г/т; серебра 1,0...2,5 г/т; в кварц-хлорит-серицитовых породах содержания золота 0,12...0,38 г/т, серебра 0,49...2,1 г/т; в кварц-хлоритовых породах содержания золота 0,018...0,12 г/т, серебра 0,49...0,68 г/т. Золото и серебро, по видимому, находятся в рассеянном состоянии в сульфидных минералах, присутствующих в изученных породах.

Породообразующие минералы околорудноизмененных пород

Главным породообразующим минералом изученных пород является кварц, который составляет до 70...80 % общего объема пород. Образует мелко-, средне-, реже крупнозернистые, молочно-белые, бело-серые, реже бесцветные (прозрачные) агрегаты.

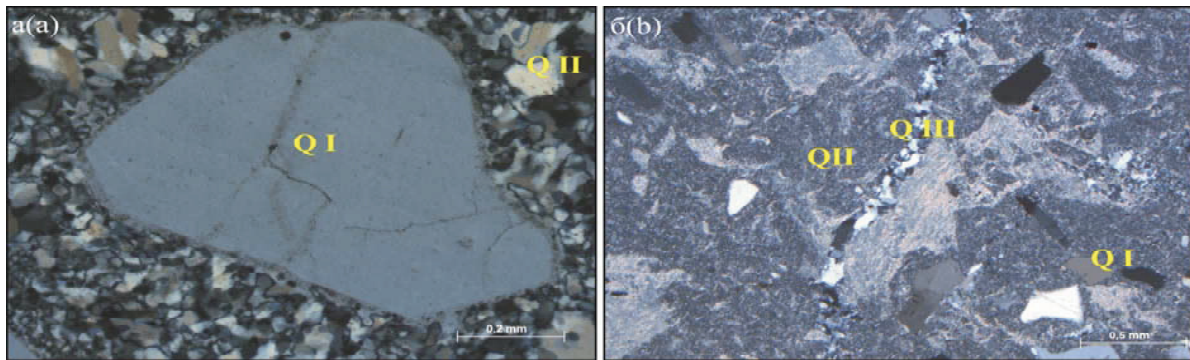


Рис. 2. Характер распределения и форма выделения кварца I, II, III генераций в изученных околорудноизмененных породах: а) порфировый обломок кварца I генерации; б) тонкий прожилок кварца III генерации в общей массе породы. Николы +. Qz – кварц, Ser – серицит

Fig. 2. Distribution character and shape of segregation of quartz I, II, III generations from wallrock-altered rocks: а) porphyritic fragment of quartz of the I generation; б) thin veinlet of quartz of the III generation in combined mass of rock. Nicols +. Qz – quartz, Ser – sericite

В изученных околорудноизмененных породах установлено три генерации кварца, первая из которых представляет собой первичный реликтовый кварц (кварц туфов), ко второй генерации относится непосредственно метасоматический кварц. Разделение на генерации было произведено на основании изучения форм выделения, характера взаимоотношений между предполагаемыми генерациями, а также с учетом полученных характеристик рентгенолюминесценции. С целью уточнения люминесцентных характеристик исследовались спектры исходных образцов кварца (РЛ-1), а также спектры после прокаливания до 500 °С (РЛ-2) [13].

Первый тип кварца (рис. 2, а) образует самостоятельные зерна (реликтовые обломки порфировых вкрапленников исходных вмещающих пород ювенильного происхождения), имеющие неравномерное распределение в общей массе породы. Как правило, это остроугольные обломки зерен, гораздо реже можно встретить идиоморфные зерна с угадываемым обликом гексагональной дипирамиды в сечении. Размер зерен кварца I варьирует от 0,5...1,5 мм. На долю кварца I приходится 20...30 % общего объема породы.

Кварц II и III являются непосредственными генерациями метасоматического процесса.

Кварц II (рис. 2, а, б) находится в тонком сростании с серицитом, образуя кварц-серицитовый агрегат, выполняющий основную ткань изучаемых кварц-серицитовых пород (50...60 % общего объема породы). Размер выделений варьирует от 0,05...0,5 мм. Образование кварца II, вероятно, отвечает началу этапа гидротермально-метасоматического преобразования вмещающих пород.

Кварц III является наименее распространенной генерацией. Выполняет небольшие прожилки, секущие кварц I и II, а также в некоторых случаях пирит. Размер выделений варьирует от 0,1...0,25 мм. Размер прожилков, как правило, не превышает 0,1·1...1,5 мм.

По данным рентгенолюминесцентного анализа изученные образцы кварца I и II из околорудноизмененных пород имеют несколько различную интенсивность свечения, а также характеризуются и различными центрами свечения.

Так, для кварца I свойственны отметки интенсивности свечения от 5...22 относительных единиц, в то время как для кварца II в среднем от 1...12 относительных единиц, такое различие интенсивности свечения, вероятно, связано с различными условиями образования, прежде всего с температурным режимом кристаллизации. Также, как было сказано выше, кварц I и II имеют различные центры свечения (рис. 3, а, б). Так, например, для кварца I весьма характерными являются полосы свечения в области 320...340 нм, а также в области 600...620 нм. Полоса свечения в области 320...340 нм отвечает наличию примесных элементов AlO_4^{4-}/Na^+ , Li^+ , H^+ [14]; в области 600...620 нм – наличию собственного центра экситонного типа (вакансия кислорода) [15].

Для кварца II наблюдается характерная полоса свечения лишь в области 280...300 нм, она характеризует наличие собственного центра экситонного типа (вакансия кислорода) [16, 17].

Серицит образует скрыточешуйчатые массы, находящиеся в тесном сростании с кварцем II генерации, и представляет собой кварц-серицитовый агрегат, весьма редко образует самостоятельные выделения бледно-зеленого цвета. Также часто можно наблюдать случаи начинающегося замещения ранее образованных зерен хлорита серицитом, где в основном серицит замещает центральные части зерен хлорита, либо их периферию (рис. 4, а). Чешуйки серицита (также как и чешуйки хлорита), в основной массе пород, не имеют какой-либо ориентировки в распределении и распределены, как правило, хаотично. Размерность выделений колеблется от 0,001 до 0,05 мм. Минерал имеет широкое распространение и отмечается в кварц-серицитовых и кварц-хлорит-сери-

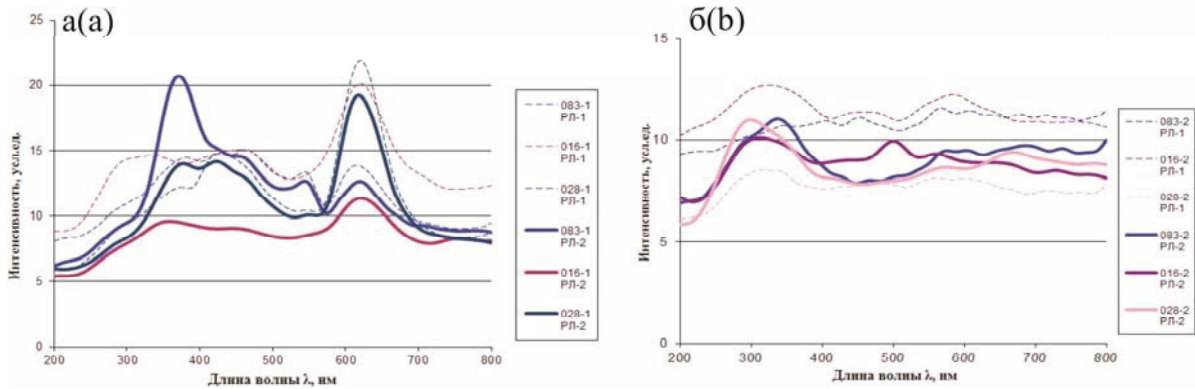


Рис. 3. Спектры РЛ-1 (исходных образцов) и РЛ-2 (после прокаливания) зерен кварца Стрижковского (083-1 РЛ-1, 083-1 РЛ-2, 083-2 РЛ-1, 083-2 РЛ-2) и Зареченского (016-1 РЛ-1, 028-1 РЛ-1, 016-1 РЛ-2, 028-1 РЛ-2, 016-2 РЛ-1, 028-2 РЛ-1, 016-2 РЛ-2, 028-2 РЛ-2) месторождений: а) спектры кварца I генерации; б) кварца второй генерации

Fig. 3. Spectrums of X-ray luminescence РЛ-1 (virgin samples) and РЛ-2 (after ignition) of quartz grains from Strizhkovsk deposit (083-1 РЛ-1, 083-1 РЛ-2, 083-2 РЛ-1, 083-2 РЛ-2) and Zarechensk deposit (016-1 РЛ-1, 028-1 РЛ-1, 016-1 РЛ-2, 028-1 РЛ-2, 016-2 РЛ-1, 028-2 РЛ-1, 016-2 РЛ-2, 028-2 РЛ-2): а) spectrums of quartz of the I generation; б) spectrums of quartz of the II generation

цитовых породах как лежачего, так и висячего боков. Химический состав серицитов околорудноизмененных пород изученных месторождений довольно выдержанный, содержания основных окислов варьируют в следующих пределах: K_2O 7,92...8,79 мас. %, Al_2O_3 28,33...29,21 мас. %, SiO_2 50,17...50,47 мас. %, MgO 2,90...3,13 мас. %, Na_2O 0,33...0,48 мас. %.

Хлорит преимущественно распространен в породах лежачего бока. В околорудноизмененных породах чешуйчатые и пластинчатые агрегаты хлорита размером от 0,0001 до 23 мм, особенно характерны для пород, образуемых по туфам кислого и основного состава, наименее распространен в метасоматитах висячего бока месторождений.

В исследуемых породах в основном наблюдаются зерна таблитчатого, реже призматического облика. Иногда по плоскостям спайности некоторых зерен хлорита можно наблюдать выделения

более поздних минералов, например, выделения рутила (рис. 4, б) или же единичные зерна сульфидов (сфалерита, халькопирита).

Согласно классификационной диаграмме [18], хлориты изученных околорудноизмененных пород (по соотношению Si к $Fe_{общ.}/(Fe_{общ.}+Mg)$) относятся к ряду клинохлор-пеннин (рис. 5). При этом хлориты Зареченского месторождения представлены переходной разностью ряда клинохлор-пеннин, в то время как хлориты Стрижковского месторождения представляют собой преимущественно чистый пеннин.

Для хлоритов околорудноизмененных пород Стрижковского и Зареченского месторождений был определен химический состав, рассчитаны кристаллохимические формулы и кристаллохимические характеристики [19]. Химический состав хлоритов изученных объектов весьма схож с химическим составом хлоритов околорудных по-

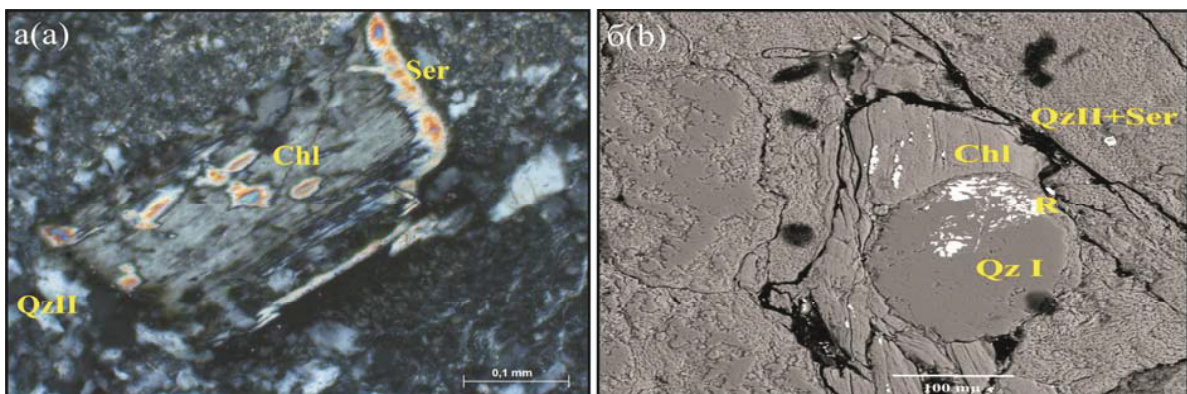


Рис. 4. а) зерно хлорита с замещаемым по периферии и центру серицитом. Никולי скрещены; б) хлорит с выделениями изометрических зерен рутила по плоскости спайности. Изображение BSE. Chl – хлорит; Ser – серицит; Qz I – кварц I генерации; Qz II – кварц II генерации

Fig. 4. а) the grain of chlorites with replaceable sericite on the periphery and in center. Nicols +; б) chlorite with secretions of isometric grains of rutile along the cleavage plane. BSE image. Chl – chlorite; Ser – sericite; Qz I – quartz of the I generation; Qz II – quartz of the II generation

род гидротермальных Cu-Pb-Zn месторождений в целом [20], где основными элементами в их составе являются Mg, Fe, Al и Si, а из примесных отмечается только Mn.

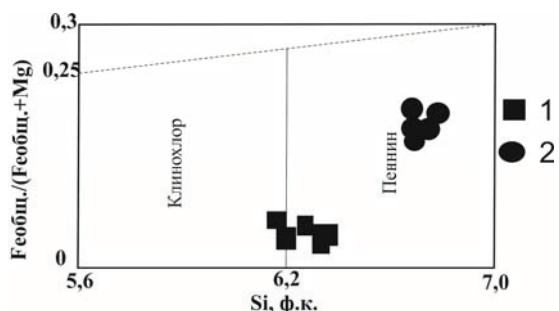


Рис. 5. Классификационная диаграмма хлоритов: 1 – Зареченского и 2 – Стрижковского месторождений. Составлена с учетом характеристик табл. 2

Fig. 5. Classification diagram of chlorites: 1 – from Zarechensk deposit and 2 – from Strizhkovsk deposit, composed together with characteristics from table 2

Таблица 2. Химический состав хлоритов околорудноизмененных пород Зареченского и Стрижковского месторождений, мас. %

Table 2. Chemical composition of chlorites from wallrock-altered rocks of Zarechensk and Strizhkovsk deposits, wt. %

Компонент Component	Хлориты (образцы)/Chlorites (samples)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	33,20	33,06	33,54	33,85	33,25	33,15	32,96	32,82	32,52	32,76
Al ₂ O ₃	17,91	19,19	18,27	20,11	20,55	17,78	17,71	17,73	17,68	17,70
FeO	3,64	3,61	3,61	4,94	4,24	11,40	11,41	11,39	11,37	11,42
MnO	0,36	0,42	0,48	0,53	0,31	0,57	0,60	0,58	0,59	0,61
MgO	33,94	33,63	31,17	30,02	30,15	27,65	27,5	27,48	27,46	27,63
Сумма Sum	89,05	89,97	87,07	89,18	88,5	90,55	90,18	90,00	89,62	90,12
Кристаллохимические формулы/Crystallochemical formulas										
Si	6,34	6,36	6,27	6,60	6,30	6,61	6,55	6,52	6,44	6,51
Al (VIII)	0,35	0,53	0,29	0,86	0,60	0,70	0,63	0,59	0,50	0,59
Al (XII)	1,66	1,64	1,73	1,40	1,70	1,39	1,45	1,48	1,56	1,49
Fe	0,58	0,58	0,56	0,79	0,67	1,90	1,90	1,89	1,88	1,90
Mn	0,06	0,07	0,08	0,09	0,05	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Mg	9,66	9,64	8,69	8,25	8,52	8,22	8,15	8,13	8,10	8,19
Кристаллохимические характеристики/Crystallochemical characteristics										
ΣAl	2,01	2,17	2,02	2,26	2,29	2,09	2,08	2,07	2,06	2,07
Fe/Σ _{Fe+Mg}	0,06	0,05	0,06	0,08	0,07	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
Fe+Mg	10,24	10,22	9,25	9,04	8,96	10,12	10,05	9,61	9,98	10,09
Al ^{IV} cor	1,70	1,68	1,77	1,46	1,75	1,52	1,57	1,61	1,69	1,62
T, °C	241	255	213	230	237	223	224	226	230	228

Примечание: расчет температур проводился по формуле McDowell, Elders, 1980 [23]. Образцы 1–5 – хлориты околорудных метасоматитов Зареченского месторождения, 6–10 – хлориты околорудных метасоматитов Стрижковского месторождения.

Note: temperatures were calculated by the McDowell, Elders formula, 1980 [23]. Samples 1–5 are the chlorites of wallrock-altered rocks from Zarechensk deposit, 6–10 are the chlorites of wallrock-altered rocks from Strizhkovsk deposit.

С использованием полученных кристаллохимических характеристик, прежде всего с учетом Al в четверной координации [21], по предложенным расчетным методикам [22–24] была вычислена температура образования хлоритов околорудноизмененных пород изученных месторождений (табл. 2).

Значения вычисленных температур варьируют в среднем от 220...250 °С, что вполне соответствует температурам образования хлоритов околорудных метасоматитов подобных месторождений Змеиногорского и смежных рудных районов, где температура их образования была определена по результатам изучения газовой-жидких включений [25].

Рудная минерализация

Рудные минералы в изученных породах развиты незначительно, представлены пиритом, галенитом, сфалеритом, халькопиритом, при этом большее распространение среди них имеет пирит.

Пирит слагает 5...20 % от объема пород. Наибольшее его распространение отмечается в околорудноизмененных породах лежащего бока месторождений, а максимальное характерно для пород, подвергшихся наименьшему изменению, и сохранивших реликтовый структурно-текстурный облик вмещающих пород – мелко-, среднезернистых туфов. Размер выделений зерен пирита варьирует от 0,025 до 0,2 мм.

Облик встречающихся кристаллов пирита несколько различен для Стрижковского и Зареченского месторождений. Так, для околорудноизмененных пород Стрижковского месторождения характерны пириты преимущественно кубического габитуса, реже, и в основном ближе к рудной части разреза, отмечаются кристаллы пентагондодекаэдрического габитуса. В околорудноизмененных породах Зареченского месторождения встречаются пириты кубического габитуса, реже кристаллы, характеризующиеся комбинацией куба и октаэдра, а также комбинацией пентагондодекаэдра с кубом [26]. Почти для всех кристаллов пирита изученных околорудноизмененных пород характерна параллельная штриховка, однако иногда можно встретить и штриховку послынного роста граней, которая отмечается в основном для кристаллов комбинации куба и октаэдра, реже для пентагондодекаэдрических кристаллов.

Часто пирит интенсивно раздроблен и разбит прожилками позднего кварца (кварца третьей генерации), также довольно часто можно наблюдать случаи замещения пирита более поздними сульфидами (преимущественно сфалеритом и галенитом).

Галенит и остальные сульфидные минералы (сфалерит и халькопирит) образуют редкую рассеянную вкрапленность преимущественно в кварцевитовых породах, слагают, как правило, 3...10 % объема пород. Размер выделения сульфидов варьирует от 0,001...0,15 мм. Они имеют свойственный им химический состав, однако отмечаются и некоторые особенности. Так, для сфалерита

Зареченского месторождения отмечается примесь Cd 0,8...1,1 вес. %, а для пирита Стрижковского месторождения – примесь Ni до 0,3 мас. %.

Барит имеет крайне ограниченное распространение и отмечен лишь в метасоматитах лежащего бока, образованных по туфам кислого состава [27]. Размер выделений колеблется от 0,003 до 0,025 мм. Отмечается в ассоциации с кварцем II. В химическом составе установлено наличие примеси Со до 0,12 мас. %.

Акцессорные минералы

Акцессорные минералы представлены цирконом, апатитом и рутилом. Встречаются эти акцессорные минералы во всех разновидностях околорудноизмененных пород, представленных на изучаемых месторождениях, а именно в кварц-хлорит-серицитовых, в кварц-серицитовых и кварц-хлоритовых разностях.

Циркон отмечается в виде короткостолбчатых, реже изометричных кристаллов (рис. 6, а) или их обломков, размером от 0,0002 до 0,35 мм. Для цирконов отмечена примесь HfO₂: для Зареченского месторождения от 1,3 до 1,5 мас. %, для Стрижковского от 1,4 до 1,65 мас. %.

Апатит встречается в основном в виде мелких зернистых масс, реже в виде хорошо образованных одиночных призматических кристаллов в кварц-серицитовом агрегате (рис. 6, б). Размер зерен апатита 0,0001 до 0,2 мм. По химическому составу апатиты Зареченского и Стрижковского месторождений относятся к фторапатиту, с содержанием F 5,10...5,32 вес. %.

Рутил в виде столбчатых, часто изогнутых кристаллов, размером от 0,001 до 0,02 мм, зачастую образует плотные зернистые агрегаты в ассоциации с апатитом и кварцем II. Также зерна рутила были отмечены в ассоциации с апатитом по плоскостям деформационной отдельности в зернах хлорита. Для рутила Зареченского месторождения отмечается примесь Fe₂O₃ до 0,6 мас. %, для рутила Стрижковского месторождения отмечается примесь Nb₂O₅ до 1,5 мас. %.

Редкоземельная минерализация

Развита редкоземельная минерализация, минеральной формой которой являются монацит и ксенотим, в кварц-серицитовых и кварц-хлорит-серицитовых породах, микрокварцитах, и менее всего в кварц-хлоритовых породах. Наибольшее распространение минералов редких земель отмечается в кварц-серицитовых породах. Монацит образует таблитчатые, призматические, реже изометрические кристаллы и сплошные зернистые агрегаты. В некоторых образцах можно встретить сростки короткопризматических кристаллов, образующих подобие игольчатых или звездчатых агрегатов (рис. 7, а). Ксенотим образует в основном сплошные мелкозернистые массы (рис. 7, б), и весьма редко единичные кристаллы призматического облика. Размер выделений монацита и ксенотима колеблется в пределах 0,001...0,05 мм.

В химическом составе монацита и ксенотима околорудноизмененных пород (табл. 3) Зареченского и Стрижковского месторождений наблюдаются некоторые отличия. Так, для монацитов Зареченского месторождения отмечается присутствие примеси ThO₂ от 11,35 до 22,50 % (среднее 16,9 мас. %) и отсутствие примеси Al₂O₃, в то время как для монацитов Стрижковского месторождения примесь ThO₂ не характерна, а Al₂O₃ варьирует от 0,8 до 1,86 мас. %, со средним содержанием 1,3 мас. %.

В химическом составе ксенотима Стрижковского месторождения в малых количествах присутствуют оксиды тория, урана и гольмия, в то время как для ксенотима Зареченского месторождения содержаний этих оксидов не установлены.

Распределение монацита и ксенотима неравномерное, их агрегатные скопления, а также единичные зерна отмечаются как в межзерновом пространстве кварц-серицитового агрегата, так и по границе между зернами пирита и кварц-серицитового агрегата, а также в виде тонких прожилков, разбивающих ранее образованные отдельные зерна и агрегаты апатита.

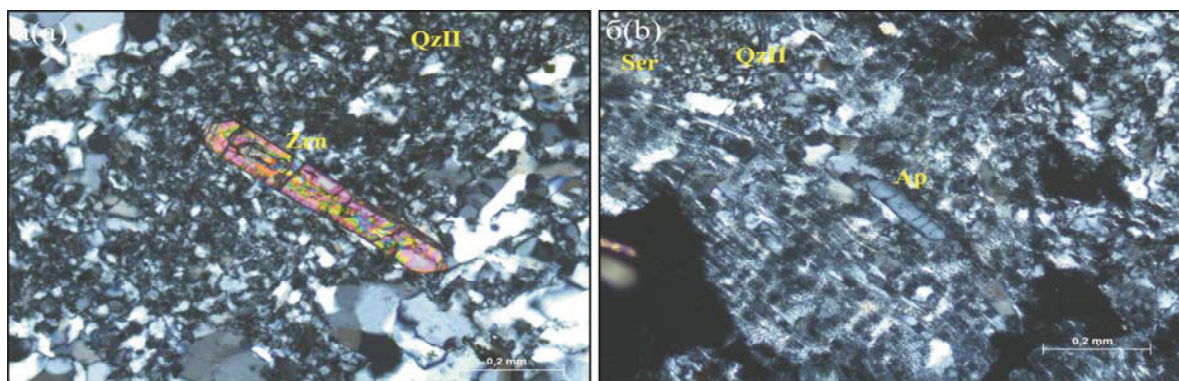


Рис. 6. Акцессорные минералы околорудноизмененных пород: а) дипирамидальное зерно циркона в кварц-серицитовом агрегате; б) призматическое зерно апатита в кварц-серицитовом агрегате. Никולי +

Fig. 6. Accessory minerals of wallrock-altered rocks а) bipyramidal grain of zircon at quartz-sericite aggregate; б) prismatic grain of apatite at quartz-sericite aggregate. Nicols +

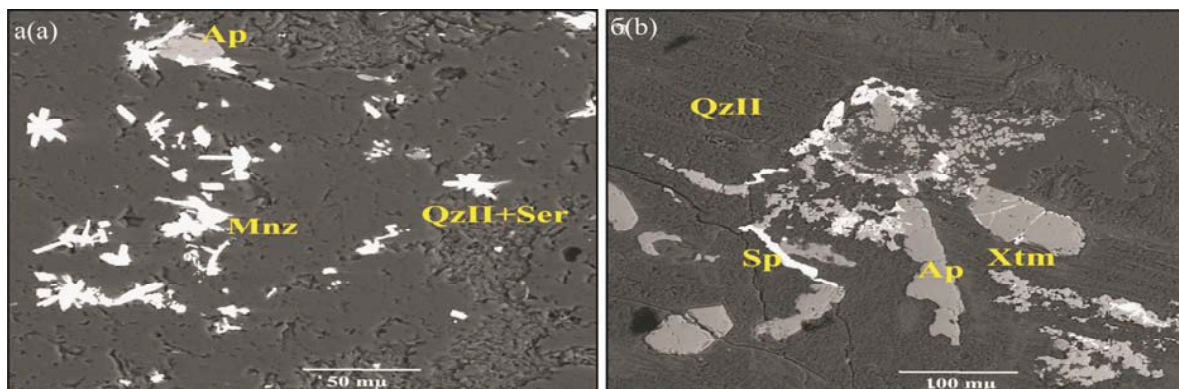


Рис. 7. Распределение редкоземельной минерализации в кварц-серицитовых породах: а) игольчатые выделения монацита между зерен кварца I и II генераций; б) выделения монацита и ксенотима между зернистыми агрегатами апатита и сфалерита. Изображение BSE. Ap – апатит, Mnz – монацит; Qz – кварц; Ser – серицит; Sp – сфалерит; Xtm – ксенотим

Fig. 7. Distribution of REE mineralization at quartz-sericite rocks: a) needle-like precipitate of monazite from quartz of the I and II generation; b) segregation of monazite and xenotime between granular aggregate of apatite and sphalerite. BSE image. Ap – apatite, Mnz – monazite; Qz – quartz; Ser – sericite; Sp – sphalerite; Xtm – xenotime

Таблица 3. Средний химический состав монацита и ксенотима околорудноизмененных пород Зареченского и Стрижковского месторождений, мас. %

Table 3. The average chemical composition of monazite and xenotime of wallrock-altered rocks from Zarechensk and Strizhkovsk deposits, wt. %

Минерал Mineral	Компонент Component	Зареченское месторождение Zarechensk deposit		Стрижковское месторождение Strizhkovsk deposit	
		Монацит Monazite	Ксенотим Xenotime	Монацит Monazite	Ксенотим Xenotime
Ce ₂ O ₃		27,4	–	35,09	–
La ₂ O ₃		12,4	–	19,23	–
Nd ₂ O ₃		9,3	–	10,13	–
Y ₂ O ₃		–	48,8	–	52,49
Yb ₂ O ₃		–	2,7	–	3,07
P ₂ O ₅		28,5	32,2	31,43	27,42
Gd ₂ O ₃		–	3,9	–	3,21
Dy ₂ O ₃		–	5,8	–	5,12
Sm ₂ O ₃		–	0–2,0	–	0,77
Er ₂ O ₃		–	0–3,9	–	3,48
ThO ₂		16,9	–	–	1,81
UO ₃		–	–	–	1,59
Ho ₂ O ₃		–	–	–	0,97
Al ₂ O ₃		–	–	1,3	–
SO ₃		1,52	–	0,8	–
CaO		1,9	0–1,2	0,7	–
CoO		–	0–0,45	–	–
SiO ₂		3,09	–	1,84	–
Сумма/Sum		100,21	99,70	99,62	99,89

Детальное изучение минерального парагенезиса околорудных метасоматитов Стрижковского и Зареченского барит-полиметаллических месторождений, позволило сформировать представление о последовательности выделения минералов, слагающих эти породы. Так, на этапе формирования вмещающих пород нижнемелличной свиты (магматический этап) происходило выделение

кварца I генерации, циркона и апатита. В дальнейшем на сформированные вмещающие породы произошло наложение процесса метасоматического замещения (с доминантой окварцевания), вызванного воздействием гидротермальных растворов (гидротермально-метасоматический этап). В результате чего происходило выделение кварца II генерации, хлорита, рутила, серицита, пирита, а также редкоземельной минерализации. В последующем, в ходе эволюции гидротермальных растворов, постепенно приобретающих металлогеническую нагрузку, происходило выделение сульфидных минералов (халькопирита, галенита, сфалерита, барита) а также, вероятно, и кварца III генерации.

Заключение

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы, в целом характеризующие околорудные метасоматиты Стрижковского и Зареченского месторождений. Изученные околорудные метасоматиты являются раннедевонскими до-рудными, гидротермальноизмененными породами, сформировавшимися в результате воздействия углекислотных растворов на вмещающие слаблитифицированные нижнедевонские вулканогенно-осадочные породы. Зоны их развития контролируются субширотными и субмеридиональными разрывными нарушениями, а также зонами расланцевания.

Согласно классификационным признакам, разработанным В.А. Жариковым и др., изученные околорудноизмененные породы по их минеральному парагенезису (Qz+Chl+Ser+Py) можно отнести к бескарбонатной фации березитов [28]. Хотя иногда такие кварц-серицитовые метасоматиты выделяют в особую формацию, весьма характерную главным образом для колчеданных и колчеданно-полиметаллических месторождений [29].

Отсутствие же карбонатов в данных породах, вероятно, можно объяснить изначальной обедненностью Са и Mg исходных замещаемых вулканитов, а также интенсивным выносом этих компонентов в процессе метасоматоза.

Изученные околорудноизмененные породы месторождений имеют нечетко выраженное зональное строение, где внутреннюю часть метасоматического ореола выполняют кварц-серицитовые породы, а внешнюю – кварц-хлорит-серицитовые и кварц-хлоритовые породы. Минеральный парагенезис околорудных пород изученных месторождений однотипный, основные минералы – кварц, хлорит, серицит и пирит, второстепенные – циркон, апатит, рутил, редкие – халькопирит, галенит, сфалерит, барит, а также монацит и ксенотим. Проведенный комплекс исследований позволил выявить некоторые типоморфные особенности минералов изученных околорудных пород, в том числе и сходства и различия в химическом составе одних и тех же минеральных видов для ис-

следуемых Зареченского и Стрижковского месторождения.

Температурный интервал формирования околорудных пород соответствует 220...250 °С, что вполне согласуется с теоретическими температурами формирования околорудных пород такой формации [28].

Таким образом, наличие подобных пород в исследуемом рудном поле или в смежных рудных полях и имеющих весьма близкие петрографо-минералогические характеристики к изученным авторами породам, могут являться поисковым признаком, указывающим на присутствие нескрытого барит-полиметаллического оруденения, наложенного на терригенно-осадочно-туфогенные толщи девона. Пространственная локализация зон околорудных метасоматитов в основном определяется разрывной тектоникой района, что упрощает поиск перспективных площадей с развитием скрытого оруденения.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чекалин В.М., Черных А.Ф., Беляев А.П. Морфология, генезис и закономерности размещения полиметаллических месторождений северо-западной части Рудного Алтая // Морфология, генезис и закономерности размещения минеральных образований Алтае-Саянской складчатой области и Сибирской платформы. – Новосибирск: Изд-во Наука, 1985. – С. 56–65.
2. Гаськов И.В. Особенности развития колчеданных рудномагматических систем в островодужных обстановках Рудного Алтая и Южного Урала. // Литосфера. – 2015. – № 2. – С. 17–39.
3. Кашин С.В., Молчанов А.В., Шатов В.В. Гидротермальные метасоматические формации регионального распространения и их использование для прогнозирования скрытого колчеданно – полиметаллического оруденения (на примере Змеиногорского рудного района, Рудный Алтай) // Региональная геология и металлогения. – 2013. – № 56. – С. 65–77.
4. Сравнительная морфотектоника внешних и внутренних структур Рудно-Алтайского мегапрогиба / О.М. Гринев, А.А. Страхов, К.В. Бестемьянова, Р.О. Гринев // Петрология магматических и метаморфических комплексов: Материалы VIII Всероссийской петрографической конференции с международным участием. – Томск, 2016. – С. 118–132.
5. Туркин Ю.А. Особенности тектонического строения и геотектоническая позиция Рудного Алтая // Природные ресурсы Гонного Алтая: сборник научных трудов. – 2010. – Вып. 2. – С. 55–70.
6. Большой Алтай (геология и металлогения). Геологическое строение. Кн. 1 / под ред. Г.Н. Щерба. – Алма-Ата: РИО ВАК РК, 1998. – 304 с.
7. Гутак Я.М., Валиева Ф.Л., Мурзин О.В. Корбалихинская свита Рудного Алтая и проблема возраста Алейского метаморфического комплекса // 300 лет горно-геологической службе России: история горнорудного дела, геологическое строение и полезные ископаемые Алтая. – Барнаул: Изд-во АГУ, 2000. – С. 200–205.
8. Бестемьянова К.В., Гринев О.М. Минералого-геохимическая характеристика вкрапленных медных руд Западно-Стрижковского барит-полиметаллического месторождения (Рудный Алтай) // Вопросы естествознания. – 2015. – № 3 (7). – С. 13–16.
9. Reed S.J.B. Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology. – N.Y.: Cambridge University Press, 2005. – 189 p.
10. Taylor C.M., Radtke A.S. Preparation and polishing of ores and mill products for microscopic examination and electron microprobe analysis // Econ. Geol. – 1965. – № 65. – P. 1306–1319.
11. Борозновская Н.Н., Быдтаева Н.Г., Корнева А.П. Люминесцентный анализ качества кварцевого сырья. – Томск: ЦНТИ, 2015. – 101 с.
12. Горжевский Д.И., Чекваидзе В.Б., Исакович И.З. Типы полиметаллических месторождений Рудного Алтая и их происхождение и методы поисков. – М.: Недра, 1977. – 197 с.
13. Gaft M., Reisfeld R., Panczer G. Modern luminescence spectroscopy of minerals and materials. – Berlin; New York: Springer, 2005. – 356 p.
14. Cathodoluminescence of quartz from sandstones: interpretation of the UV range by determination of trace element distribution and fluid-inclusion P-T-X properties in authigenic quartz / C. Demars, M. Pagel, E. Deloule, P. Blanc // Amer. Miner. – 1996. – V. 81. – P. 891–901.
15. Борозновская Н.Н., Быдтаева Н.Г. Люминесценция как индикатор микродефектности при оценке качества кварцевого сырья // Рудные месторождения, минералогия, геохимия. – Томск: ТГУ, 2003. – С. 12–27.
16. Cathodoluminescence and trace element zoning in quartz phenocrysts and xenocrysts / G.R. Watt, P. Wright, S. Galloway, C. McLean // Geochim Cosmochim Acta. – 1997. – № 61 (5). – P. 4337–4348.
17. Pagel M. Cathodoluminescence in geosciences. – Berlin; New York: Springer, 2000. – 514 p.
18. Hey M.H. A new review of the chlorites // Mineralogical magazine. – 1954. – № 30. – P. 277–292.
19. Кепежинская К.Б. Статистический анализ хлоритов и их парагенетические типы. – М.: Акад. наук СССР, Институт геологии и геофизики. Сибирское отделение Наука, 1965. – 135 с.
20. Shikazono N., Kawahata H. Compositional differences in chlorite from hydrothermally altered rocks and hydrothermal ore deposit // Canadian Mineralogist. – 1987. – № 25. – P. 465–474.
21. Jiang W., Peacor D.R., Buseck P.R. Chlorite geothermometry-contamination and apparent octahedral vacancies // Clays and clay minerals. – 1994. – № 5. – P. 593–605.
22. De Caritat P., Hutcheon J., Walshe Jh.L. Chlorite geothermometry // Clays and Minerals. – 1993. – V. 41. – № 2. – P. 219–239.
23. McDowell S.D., Elders W.A. Authigenic layer silicate minerals in borehole Elmore, Salton Sea geothermal field, California, USA // Contrib. Mineral. Petrol. – 1980. – V. 74. P. 293–310.

24. Kranidiotis P., MacLean W.H. Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec // *Econ. Geol.* – 1987. – V. 82. – P. 1898–1911.
25. Авдонин В.В. Структурно-морфологические типы и околорудные породы колчеданно-полиметаллических месторождений северо-западной части Рудного Алтая // *Геология рудных месторождений.* – 1980. – № 2. – С. 49–66.
26. Бестемьянова К.В. Околорудноизмененные породы барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района (Рудный Алтай) // *Байкальская молодежная научная конференция по геологии и геофизике.* – Горячинск, 2015. – С. 190–194.
27. Бестемьянова К.В., Гринев О.М. Минеральный состав околорудных метасоматитов барит-полиметаллических месторож-
- дений Змеиногорского рудного района (Рудный Алтай) // *Новое в познании процессов рудообразования: Четвертая Российская молодежная школа с международным участием.* – М.: ИГЕМ РАН, 2014. – С. 67–72.
28. Жариков В.А., Русинов В.Л., Маракушев А.А. *Метасоматизм и метасоматические породы.* – М.: Научный мир, 1998. – 492 с.
29. Жариков В.А., Омеляненко Б.И. Некоторые проблемы изучения изменений вмещающих пород в связи с металлогеническими исследованиями // *Изучение закономерностей минерализации при металлогенических исследованиях.* – М.: Недра, 1965. – С. 119–124.

Поступила 01.07.2017 г.

Информация об авторах

Бестемьянова К.В., младший научный сотрудник лаборатории геохронологии и геодинамики Геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

Гринев О.М., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры палеонтологии и исторической геологии Геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDC 553.242.4: 553.444

WALLROCK METASOMATITES OF BARITE-POLYMETALLIC DEPOSITS OF ZMEINOGORSK ORE DISTRICT (RUDNY ALTAI)

Ksenia V. Bestemianova¹,
KsenijaVT@mail.ru

Oleg M. Grinev¹,
tomskgrom@yandex.ru

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

The relevance of the research is caused by depletion of mineral resources of the north-western part of Rudny Altai region. In this relation it is necessary to find new hidden objects of barite-polymetallic ores in this region. As wallrock-altered rocks accompany inherently mineralization, their detailed study will allow predicting the presence of hidden polymetallic mineralization within Zmeinogorsk ore region.

The main aim of the study is to determine petrographic, mineralogical and some genetic characteristics of the wallrock-altered rocks from Zarechensk and Strizhkovsk barite-polymetallic deposits in the north-western part of Zmeinogorsk ore region (Rudny Altai).

Research methods. The authors have carried out the comprehensive study of wallrock-altered rocks, including characteristics of non-metal and ore mineralization on the polarizing microscope, besides the study of rocks and minerals by X-ray energy-dispersive microanalysis, X-ray luminescence, X-ray fluorescence (XRF) and atomic absorption analysis were investigated.

The results. The studied wallrock-altered rocks from Zarechensk and Strizhkovsk barite-polymetallic deposits have similar mineral composition and belong to noncalcareous facies of beresites. The main rock-forming minerals are quartz, chlorite, sericite; secondary minerals include pyrite and in small amounts sulfides of ore step (sphalerite, galena, chalcopyrite), preferably in the form of veinlets; rare minerals are apatite, zircon, and rutile. The presence of rare earth mineralization was found out as well. Some typomorphic features of major, minor and rare minerals were fixed. The existence of three generations of quartz in the studied rocks and their luminescence centers were determined. Chlorite of the studied rocks, belonging to the range clinoclone – pennine, was used as a natural geothermometer for determining the approximate temperature range of wallrock-altered rocks formation. The calculated temperature for chlorites from Zarechensk deposit was 210...240 °C and from those from Strizhkovsk deposit – 220...230 °C. Industrial contents of gold and silver were not identified in the studied rocks.

Key words:

Wallrock-altered rocks, metasomatites, mineral assemblage, barite-polymetallic mineralization, Rudny Altai.

The research was carried out according to the government task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

REFERENCES

1. Chekalin V.M., Chernykh A.F., Belyaev A.P. Morfologiya, genesis i zakonmernosti razmeshcheniya polimetallicheskikh mesotogodny severo-zapadnoy chasti Rudnogo Altaya [Morphology, genesis and patterns of polymetallic deposits distributions in the northwestern part of the Rudny Altai]. *Morfologiya, genesis i zakonmernosti razmeshcheniya mineralnykh obrazovaniy Altae-Sayanskoy skladdchatoi oblasti i Sibirskoy platform* [Morphology, genesis and location regularities of mineral formation of the Altai-Sayan region and Siberian platform]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. pp. 56–65.
2. Gaskov I.V. Specific features of pyrite ore-magmatic systems development in the island arc environments of Rudny Altai and Southern Urals. *Litosfera*, 2015, no. 2, pp. 17–39. In Rus.
3. Kashin S.V., Molchanov A.V., Shatov V.V. Gidrotermalnye metasomaticheskie formatsii regionalnogo rasprostraneniya i ikh ispolzovanie dlya prognozirovaniya skrytogo kolchedanno-polimetallicheskogo orudneniya (na primere Zmeinogorskogo rudnogo raiona, Rudny Altay [Hydrothermal metasomatic formation of the regional distribution and their application to predict hidden pyrite-polymetallic mineralization (for example, Zmeinogorsk ore district, Rudny Altai)]. *Regionalnaya geologiya i metallogeniya*, 2013, no. 56, pp. 65–77.
4. Grinev O.M., Strahov A.A., Bestemianova K.V., Grinev R.O. Sravnitel'naya morfotektonika vneshnikh i vnutrennikh struktur Rudno-Altayskogo megaprogiba [Comparative morphotectonics of external and internal structures of the Rudny Altai megatrough]. *Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov. Materialy VIII vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Proc. 8th science meeting. Petrology of magmatic and metamorphic complexes]. Tomsk, 2016. pp. 118–132.
5. Turkin Yu.A. Osobennosti tektonicheskogo stroeniya i geotektonicheskaya pozitsiya Rudnogo Altaya [The features of tectonic structure and geotectonic position of Rudny Altai]. *Prirodnye resursy Gornogo Altaya*, 2010, no. 2, pp. 55–70.
6. Scherba G.N. *Bolshoy Altay* [Great Altai (Geology and metallogeny)]. Book 1. Almaty, Gylm Publ., 1998, 304 p.
7. Gutak Ya.M., Valieva F.L., Murzin O.V. Korbalikhinskaya svita Rudnogo Altaya i problemy vozrasta Aleyskogo metamorficheskogo kompleksa [Korbalikhinskaya suite of Rudny Altai and problem of the age of Aleisk metamorphic complex]. *300 let gorno-geologicheskoy slugbe Rossii: istoriya gornorudnogo dela, geologicheskoe stroeniye i poleznye iskopaemye Altaya* [300 years of mining-and-geological service of Russia: history of mining, geological structure and minerals of Altai]. Barnaul, 2000. pp. 200–205.
8. Bestemianova K.V., Grinev O.M. Mineralogical and geochemical characteristics of disseminated cooperish ores of the west-Strizhkovskoe barite-polymetallic deposit (Rudny Altai). *The question of natural science*, 2015, no. 3 (7), pp. 13–16. In Rus.
9. Reed S.J.B. *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*. N.Y., Cambridge University Press, 2005. 189 p.
10. Taylor C.M., Radtke A.S. Preparation and polishing of ores and mill products for microscopic examination and electron microprobe analysis. *Econ. Geol.*, 1965, no. 65, pp. 1306–1319.

11. Boroznovskaya N.N., Bydtaeva N.G., Korneva A.P. *Lyuminest-sentny analiz kachestva kvartseвого syr'ya* [Luminescent analysis of quality of raw quartz]. Tomsk, TsNTI Publ., 2015. 101 p.
12. Gorgevski D.I., Chekvaizde V.B., Isakovich I.Z. *Tipy polimetallicheskih mestorozhdeniy Rudnogo Altaya i ikh proiskhozhdenie i metody poiskov* [Types of polymetallic deposits of Rudny Altai and their origin and research methods]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 197 p.
13. Gaft M., Reisfeld R., Panczer G. *Modern luminescence spectroscopy of minerals and materials*. Berlin; New York, Springer Publ., 2005. 356 p.
14. Demars C., Pagel M., Delouie E., Blanc P. Cathodoluminescence of quartz from sandstones: interpretation of the UV range by determination of trace element distribution and fluid-inclusion P-T-X properties in authigenic quartz. *American Mineralogist*, 1996, vol. 81, pp. 891–901.
15. Boroznovskaya N.N., Bydtaeva N.G. *Luministsentsiya kak indikator mikrodefektnosti pri otsenke kachestva kvartseвого syr'ya* [Luminescence as micro defect structures indicator in assessing the quality of quartz]. Rudnye mestorozhdeniya, mineralogiya, geokhimiya. Tomsk, TGU Publ., 2003. pp.12–27.
16. Watt G.R., Wright P., Galloway S., McLean C. Cathodoluminescence and trace element zoning in quartz phenocrysts and xenocrysts. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 1997, vol. 61, no. 20, pp. 4337–4348.
17. Pagel M. *Cathodoluminescence in geosciences*. Berlin, Springer, 2000. 514 p.
18. Hey M.H. A new review of the chlorites. *Mineralogical magazine*, 1954, no. 30, pp. 277–292.
19. Kepeginskas K.B. *Statistichesky analiz khloritov i ikh parageneticheskie tipy* [Statistical analysis of chlorite and its paragenetic types]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 135 p.
20. Shikazono N., Kawahata H. Compositional differences in chlorite from hydrothermally altered rocks and hydrothermal ore deposit. *Canadian Mineralogist*, 1987, no. 25, pp. 465–474.
21. Jiang W., Peacor D.R., Buseck P.R. Chlorite geothermometry-contamination and apparent octahedral vacancies. *Clays and clay minerals*, 1994, no. 5, pp. 593–605.
22. De Caritat P., Hutcheon J., Walshe Jh.L. Chlorite geothermometry. *Clays and Minerals*, 1993, vol. 41, pp. 219–239.
23. McDowell S.D., Elders W.A. Authigenic layer silicate minerals in borehole Elmore, Salton Sea geothermal field, California, USA. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1980, vol. 74, pp. 293–310.
24. Kranidiotis P., MacLean W.H. Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec. *Econ. Geol.*, 1987, vol. 82, pp. 1898–1911.
25. Avdonin V.V. *Strukturno-morfologicheskie tipy i okolorudnye porody kolchedanno-polimetallicheskih mestorozhdeniy severozapadnoy chasti Rudnogo Altaya* [Structural -morphological types and wallrock-altered rocks of pyrite-polymetallic deposits in the northwestern part of the Rudny Altai]. Geologiya rudnykh mestorozhdeniy, 1980, no. 2, pp. 49–66.
26. Bestemyanova K.V., Grinev O.M. Okolorudnoizmenennyye porody barit-polimetallicheskih mestirogdeniy Zmeinogorskogo rudnogo raiona (Rudny Altai) [Wallrock-altered rocks from barite-polymetallic deposits of Zmeinogorsk ore district (Rudny Altai)]. *Baikalskaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya po geologii i geofizike* [Baikal Youth Scientific Conference on Geology and Geophysics]. Goryachinsk, 2015. pp. 190–194.
27. Bestemyanova K.V., Grinev O.M. Mineralny sostav okolorudnykh metasomatitov barit-polimetallicheskih mestorozhdeniy Zmeinogorskogo rudnogo raiona (Rudny Altai) [Mineralogical composition of wallrock-altered rocks of barite-polymetallic deposits at Zmeinogorsk ore district]. *Novoe v poznanii protsessov rudoobrazovaniya: Materialy chetvertoy rossyskoy molodezhnoy shkoly s mezhdynardnym uchstiem* [New knowledge in mineralization. Proc. of the Fourth Russian Youth School with international participation]. Moscow, 2014. pp. 67–72.
28. Zharikov V.A., Rusinov V.L., Marakushev A.A. *Metasomatizm i metasomaticheskie porody* [Metasomatism and metasomatic rocks]. Moscow, Nauchny mir Publ., 1998. 492 p.
29. Zharikov V.A., Omelyanenko B.I. Nekotorye problemy izucheniya izmeneniya vmeshchayushchikh porod v svyazi s metallogenicheskimi issledovaniyami [Some problems of studying changes in the host rocks in relation to metallogenic studies]. *Izuchenie zakonornosti mineralizatsii pri metallogenicheskikh issledovaniyakh* [The research of mineralization regularities in metallogenic studies]. Moscow, Nedra Publ., 1965. pp. 119–124.

Received: 1 July 2017.

Information about the authors

Ksenia V. Bestemianova, junior researcher, National Research Tomsk State University.

Oleg M. Grinev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk State University.

УДК 502.51 (571.16)

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕКРЕАЦИОННО-ОЗДОРОВИТЕЛЬНОЙ ЗОНЫ «КЛЮЧИ» (ТОМСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Семенова Наталья Михайловна¹,
nmsemnv@mail.tomsknet.ru

Назаров Александр Дмитриевич²,
nazarov@tpu.ru

Лойко Сергей Васильевич¹,
s.loyko@yandex.ru

Сидорина Наталья Геннадьевна³,
sidorinang@med.tomsk.ru

Тишин Платон Алексеевич¹,
tishin_pa@mail.ru

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

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

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

С момента своего возникновения г. Томск постепенно подчиняет себе прилегающие земли, определяя их функциональное назначение и условия использования, а по мере необходимости за их счет расширяет свои границы, включая в свой состав отдельные участки бывших пригородных территорий.

В XIX в. в лесных массивах вокруг Томска, особенно по его западной и южной периферии, сформировался обширный пояс пригородных дач. Современная застройка Томска активно внедряется в традиционные для томичей места отдыха, свободной и организованной рекреации, вызывая при этом комплекс социальных и экологических противоречий и проблем. При этом наиболее серьезные последствия ожидаются в местах концентрации и длительного целевого использования рекреационных и оздоровительных ресурсов, попадающих в сферу влияния жестких конкурирующих интересов развития традиционного дачного хозяйства и современной элитной коттеджной застройки. Примером тому является территория в окрестностях старого лечебно-оздоровительного комплекса г. Томска, расположенного в рекреационно-дачном поясе ближнего пригорода у пос. Ключи.

В связи с интенсивным освоением и застройкой прилегающих земель лечебно-оздоровительный комплекс постепенно лишается связи с природным окружением. Возникает проблема сохранения качества природных вод выходящих здесь родников и обеспечения сохранности уникального тростникового болота, являющегося ключевым звеном местного экологического каркаса и одновременно основным препятствием для сплошной застройки территории.

Цель работы: анализ условий, традиций и перспектив использования природных ресурсов рекреационного и лечебно-оздоровительного назначения в ближнем пригороде г. Томска в окрестностях пос. Ключи; геоэкологическая оценка ресурсного потенциала уникального водно-болотного комплекса, наделенного статусом особо охраняемой природной территории.

Методы исследования: работа с картографическими материалами и нормативными правовыми документами, определяющими особенности современной градостроительной и экологической ситуации в окрестностях пос. Ключи; ландшафтно-геоботанические исследования, зондирование органо-минеральных отложений в долине р. Бордянки; картирование и опробование родников по р. Бордянке; физико-химические и радиологические исследования родниковых вод.

Результаты. Установлены особенности природных ресурсов долины р. Бордянки и условия их использования. Представлены результаты анализа родниковых вод, находящихся в сфере традиционного водопользования. Обоснована природная уникальность района исследований. Рассмотрена принципиальная возможность планирования лечебно-оздоровительной местности на базе Центра реабилитации «Ключи» в южном секторе ближнего пригорода г. Томска.

Ключевые слова:

Родники, травертины, водно-болотные угодья, природные минеральные воды, радоновые воды, особо охраняемые природные территории, лечебно-оздоровительные местности, пос. Ключи, г. Томск.

Введение

Исследуемая территория находится на правом берегу р. Басандайки – малого правобережного притока р. Томи (рис. 1), ограничивающего с юга распространение зоны основной застройки пригородного типа. Расстояние от жилых кварталов

Томска по автодорожке около 7 км, от р. Томи по прямой – около 4 км.

Рельеф района очень пересеченный и весьма контрастный. Долина Басандайки глубоко врезана. В ее строении в данном районе четко выражена правосторонняя асимметрия. Правый борт более

крутой, расчленен овражно-балочной сетью и покрыт древесно-кустарниковой растительностью. Абсолютные отметки изменяются от 90 м в пойме Басандайки до 190 м в краевой части водораздельного плато. Протяженность берегового склона в пределах 1,5–2 км.

Однако сложность рельефа и залесенность склоновых поверхностей в настоящее время уже не являются серьезными препятствиями для освоения данной территории. Расположенные здесь старые населенные пункты (д. Писарево, пос. Ключи) разрастаются по площади, превращаясь в современные коттеджные поселки. Транзитные линейно-транспортные сооружения непосредственно нарушают целостность берегового склона р. Басандайки, что ставит под угрозу дальнейшее существование еще сохранившихся здесь ценных в экологическом, рекреационно-оздоровительном, научном и эстетическом отношении природных объектов и участков.

В результате длительного хозяйственного использования ландшафтный покров в рассматрива-

емом районе Томска претерпел существенные антропогенные изменения. От припоселкового кедрача у д. Писарево, объявленного в 80-е годы XX в. ботаническим памятником природы Томской области, сохранился лишь небольшой участок площадью около 1 га. Новые инициативы по охране ландшафтов связаны здесь с выделением особо охраняемой природной территории «Долина р. Бордянка», созданной в 2010 г. по ходатайству местного населения, возражающего против сплошной застройки рекреационно ценных земель.

Река Бордянка – малый правобережный приток р. Басандайка, впадающий в нее ниже по течению от д. Писарево. Расширенное днище долины этой реки занимает тростниковое болото богатого грунтового питания (рис. 1), наличие которого, в сущности, и обеспечило в свое время научную поддержку установления здесь режима ограниченного природопользования путем создания особо охраняемой природной территории местного значения.

На высоком правом берегу р. Бордянки расположен Центр реабилитации ФСС РФ «Ключи». Это

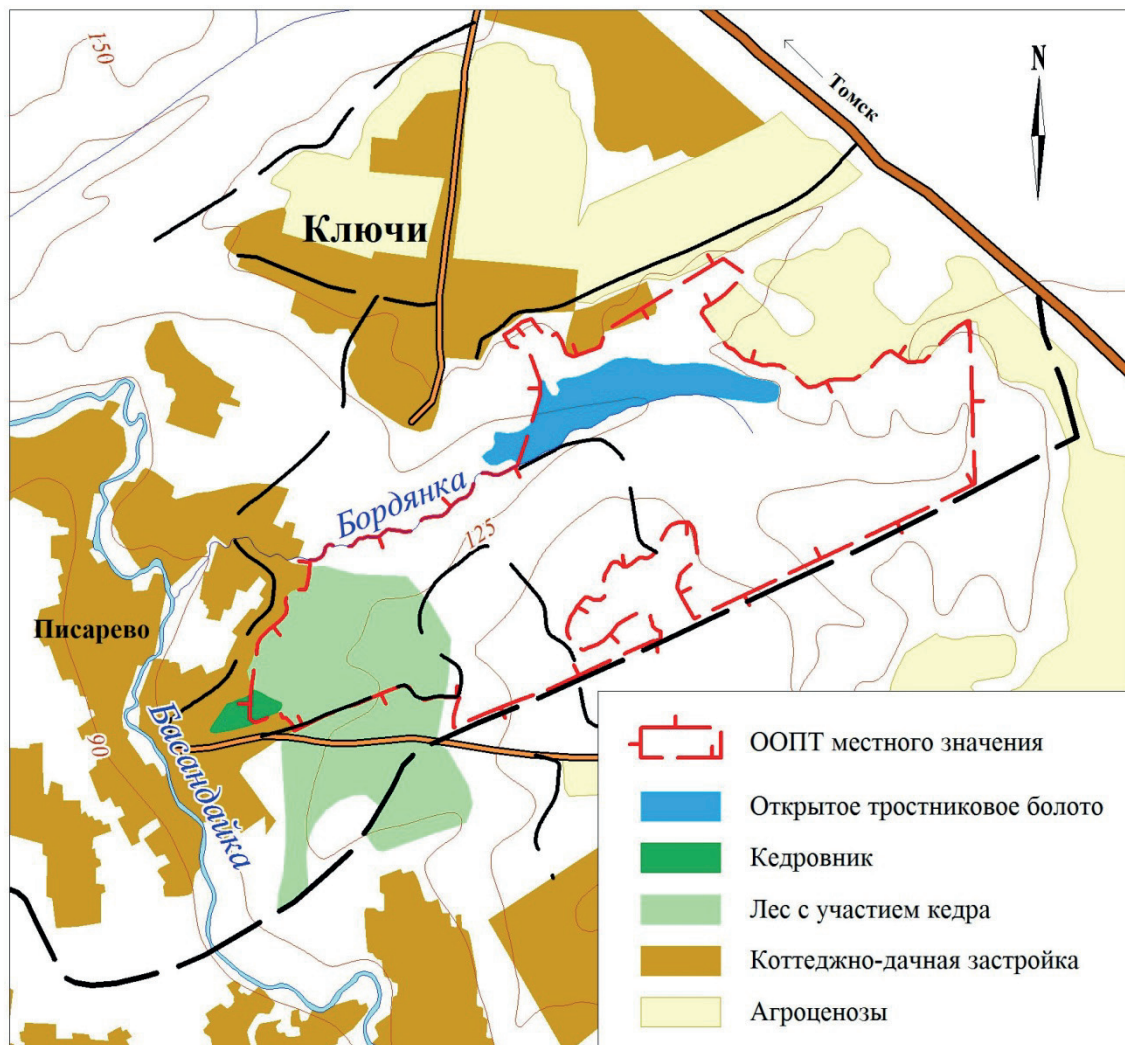


Рис. 1. Обзорная схема района исследований

Fig. 1. Overview outline of the research area

современный лечебно-оздоровительный комплекс, рассчитанный на одновременный прием 250 человек. Он открыт в марте 2000 г., но имеет весьма длительную предысторию.

Центр реабилитации «Ключи» построен на месте старого лечебно-оздоровительного учреждения ближнего пригорода Томска с одноименным названием. Считается, что в определенном смысле район размещения Центра реабилитации «Ключи» – «святое место». Еще в дореволюционное время здесь находилась монастырская заимка, где в 1898 г. была построена деревянная церковь Иоанно-Предтеченского женского монастыря. На территории монастыря били ключи с «целебной», как считали в народе, водой [1]. Памятниками былой деятельности монахов в данном районе являются остатки насыпи плотины и группа старых высокоствольных тополей на правом берегу р. Бордынки.

Таким образом, задачи территориальной охраны природы в данном районе Томска сочетаются с интересами планирования здесь лечебно-оздоровительной местности. И если сохранение ценных в природном отношении объектов в принципе возможно путем ограничения небольших по размерам «заповедных» участков, то понятие «лечебно-оздоровительная местность» предполагает выделение более значительных площадей, обеспечивающих защиту и надлежащее использование имеющегося комплекса природных лечебно-оздоровительных ресурсов.

У Центра реабилитации «Ключи», благодаря уникальному соседству одного из старых припоселковых кедровников, по определению тяготеющих к хорошо дренированным местоположениям, и комплекса фитоценозов тростникового болота, формирование которого обусловлено условиями повышенного увлажнения, имеются достаточные пространственные резервы, чтобы говорить о планировании здесь лечебно-оздоровительной местности. Большая часть этой площади находится в статусе особо охраняемой природной территории местного значения и обладает уникальными природными ресурсами как утилитарного потребительского, так и непосредственно лечебно-оздоровительного назначения.

Материалы и методы исследований

Материалы, характеризующие природные условия и особенности рассматриваемой территории, получены во время полевых исследований, проводившихся в период с 2009 по 2016 гг. Отбор проб родниковой воды для проведения испытаний в лабораторных условиях и определения удельной активности радона производился в полевые сезоны 2014 и 2016 гг.

Физико-химический и микробиологический анализ воды выполнялся на базе Испытательной лаборатории природных лечебных ресурсов Томского научно-исследовательского института курортологии и физиотерапии. Испытания проведены на соответствие ГОСТ Р 54316–2011 «Воды ми-

неральные природные питьевые», СанПиН 2.1.4.1074 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды», СанПиН 2.3.2.1078 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов» с использованием титриметрических, гравиметрических, электрохимических методов и следующего аналитического оборудования: весы аналитические ВЛР-200, рН-метр, иономер HANNA, вольтамперметрический анализатор СТА-1.

Содержание микроэлементов определялось в лаборатории Центра коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» Томского государственного университета методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (прибор Agilent 7500 сх, аналитики Е.В. Рабцевич, Е.И. Никитина) по методике НСАМ-ХМ № 480-Х [2].

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

В процессе выполнения работы проведен анализ градостроительной ситуации, природоохранных инициатив и экологических ограничений в окрестностях пос. Ключи. Составлены актуальные карты природно-хозяйственных особенностей района работ и размещения исследованных родников.

Статус территорий природоохранного назначения в исследуемом районе определен на основе анализа официальной правоустанавливающей документации. Для этих целей использовались как индивидуальные нормативные правовые источники, так и типовые реестры областного и муниципального уровня.

Природные особенности района исследований

Характерной особенностью района исследований являются многочисленные выходы подземных вод. Здесь известно 33 родника, дающих начало как минимум 20 ручьям.

В верхнем течении р. Бордынки родники выходят на отдельных участках и приурочены к заболоченным циркам (рис. 2). У Центра реабилитации «Ключи» сочится весь склон, что благоприятствует образованию микроползней и сползанию грунта. Выходы родников проявляются на разных высотных отметках. Свободный родниковый сток переувлажняет большую (до 400 м в диаметре) площадь цирка. Для сбора поверхностного стока у подножия склона выкопан пруд-водоприемник, вода из которого используется для хозяйственных нужд.

На гриве, ведущей от корпусов Центра реабилитации «Ключи» к р. Бордынке, отмечается восходящий выход родников с расходящимися в раз-

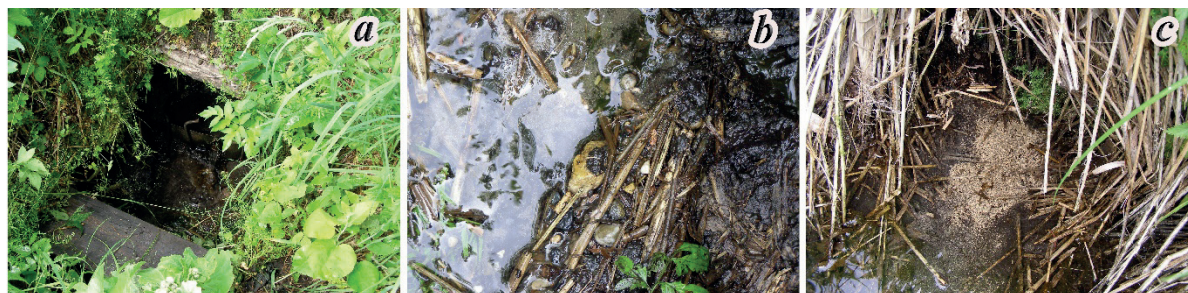


Рис. 2. Родники в верховьях р. Бордянки: а) старый заброшенный колодец; б) песок и галька в месте выхода грунтовых вод; с) фонтанирующий родник среди тростниковых зарослей

Fig. 2. Springs in the upper of the Bordyanka River: a) old unused well; b) sand and gravel at the groundwater outlet; c) fountain spring among reed thickets

ные стороны 3 ручьями, а в низине – нисходящий. Один родник каптирован трубой и бетонной стенкой. К нему от Центра реабилитации проложена широкая металлическая лестница на сваях. Непосредственно у родника и вдоль лестницы оборудованы места для отдыха.

Расход воды на выходе из трубы 0,17 л/с. Вода холодная. В предыдущие годы ее температура составляла около 7 °С. Измерения летом 2016 г. показали, что после устройства нового каптажа вода на выходе из сливной трубы стала прогреваться до 10 °С.

Интенсивный выход родников наблюдается на левом берегу р. Бордянки в месте выхода реки в пойму р. Басандайки. Здесь, на залесенном склоне коренного берега над садовыми участками, проложены нагорные каналы и организован водоприемник. Один ручей по длинной системе открытого стока родниковой воды сбрасывается концевой трубой на дорогу перед мичуринскими участками и назван «Серебряным». Расход воды на выходе из трубы 0,65 л/с, температура воды 7 °С.

Исследуемая территория относится к зоне современного травертинообразования на северных отрогах Алтае-Саянской горной страны [3]. Признаки травертинообразования (рис. 2, табл. 1) в той или иной мере проявляются во всех пунктах отбора проб в местах выхода родников по р. Бордянке. Другой особенностью местных родников является присутствие в их воде радона. Содержание радона в некоторых родниках, по данным исследований второй половины прошлого столетия, достигало 130–150 Бк/дм³. В этой связи один родник на правобережном склоне долины р. Бордянки выше Центра реабилитации «Ключи» именовался «Радоновым».

По составу воды изученные нами родники (рис. 3) имеют определенные черты сходства и некоторые различия с широко известными карбонатными источниками Томской области – Таловскими известковыми чашами и Звездным ключом, обнаруживая при этом интересные закономерности распределения химических элементов в местной ландшафтно-геохимической системе. Так, соглас-



Рис. 3. Схема отбора проб воды по р. Бордянке

Fig. 3. Layout of water sampling along the Bordyanka River

но результатам лабораторных испытаний, содержание основных ионов в воде данных родников в целом ниже, чем в источнике «Таловские известковые чаши», но выше, чем в воде Звездного ключа. Исключение составляет Аннушкин ключ у Центра реабилитации «Ключи», где по ряду измеренных показателей наблюдаются более высокие значения даже по сравнению с Таловскими чашами (табл. 2). Кроме того, в бордянских родниках обнаружено более высокое содержание сульфатов и хлоридов.

Таблица 1. Перечень исследованных водных объектов в долине р. Бордянки

Table 1. List of studied water bodies in the Bordyanka River valley

Пункты отбора проб на рис. 3 Sampling points in Fig. 3	Краткая характеристика исследованных водных объектов и пунктов отбора проб Brief description of studied water bodies and sampling points
P-1	Родник в верховьях р. Бордянки. Выходит среди обильного высокотравья. Старый колодезь A spring at headwaters of r. Bordyanka. Emerges in high grasses
P-2	Родник в верховьях р. Бордянки. В месте выхода воды намывтый песок A spring at headwaters of r. Bordyanka. Drift sand at exit point
P-3	Родник в верховьях р. Бордянки. В месте выхода воды серый песок и галька размером 0,5–3,0 см A spring at headwaters of r. Bordyanka. Gray sand and pebble stone of 0,5 to 3,0 cm found at exit point
P-4	Ручей – исток р. Бордянки A spring – source of the river Bordyanka
P-5	Фонтанирующий родник, травертиновые образования на поверхности земли A spouting spring, travertine deposits present
P-6	Река Бордянка ниже Центра реабилитации «Ключи» River Bordyanka downstream of rehabilitation center «Klyuchi»
P-7	Родник на левом берегу Бордянки; у подножия склона A spring on the left bank of the river Bordyanka; near bottom of a slope
P-8	Капированный родник «Серебряный ключ». Выходит из трубы, образуя небольшой водопад. Галька и гравий в месте падения воды. Рыхлые крупинки осаждающихся карбонатов на поверхности земли A capping spring «Serebryaniy klyuch». Exits from a pipe forming a miniature waterfall. Pebble stone at water fall. Loosen carbonate deposits on the ground
p-9	Капированный родник «Аннушкин ключ» у Центра реабилитации «Ключи» A capping spring «Annushkin Klyuch» in vicinity of the rehabilitation center «Klyuchi»

Во всех пробах (табл. 2), кроме пробы из Аннушкина ключа, содержание кальция и магния выше,

чем в воде Звездного ключа, но ниже, чем в источнике «Таловские чаши». В воде Аннушкина ключа концентрация кальция и, особенно, магния (в 1,8 раза) выше, чем в источнике «Таловские чаши».

Натрия в большинстве проб немного меньше, чем в воде Звездного ключа, а в Аннушкином ключе в 1,5 раза больше, чем в Таловских чашах. Содержание калия в большинстве проб находится на уровне его присутствия в воде Звездного ключа и Таловских известковых чаш, в воде из Аннушкина ключа почти в 3 раза выше. Следует также отметить более высокое содержание в воде этого ключа по сравнению с источником «Таловские известковые чаши» бора, титана, бария, стронция, скандия. В то же время содержание марганца более чем 2 раза ниже.

Максимальная концентрация цинка (222 мкг/л), превышающая его содержание в источнике «Таловские чаши», отмечена в воде Серебряного ключа на левом берегу р. Бордянки. Наиболее высокая концентрация хрома (3,2 мкг/л) зафиксирована в фонтанирующем роднике в верховьях р. Бордянки.

В Аннушкином ключе отмечена наиболее высокая концентрация железа, превосходящая его содержание в р. Бордянке (табл. 2), что, кроме естественных причин, можно связывать с последствиями техногенного обустройства территории в районе Центра реабилитации «Ключи», в том числе непосредственно на участке выхода этого ключа. В целом современное состояние природного комплекса долины р. Бордянки во многом определяется характером и интенсивностью антропогенного воздействия. Не исключено, что длительная антропогенная нагрузка является причиной отсутствия здесь хорошо выраженных травертиновых конструкций, как, например, у Звездного ключа по р. Тугояковке, хотя обломки породы отмечают по всему склону в зоне выхода ключей.

На левом берегу р. Бордянки выходы родников сопровождалась интенсивным выделением карбонатов на всех предметах. Ранее здесь отмечались целые полянки карбонатного мха. Сейчас это все уничтожено, хотя техногенная нагрузка в зоне стока родниковой воды пока остается невысокой.

Механическая нагрузка на занятое болотом днище долины практически отсутствует. Здесь сформировались уникальные в своем роде мощные толщи насыщенных карбонатами болотных отложений, состоящих из торфа, травертина и торфяно-травертиновой смеси. В верховьях долины под пологом обильных тростниковых зарослей и подстилкой из тростникового опада залегает мокрый черный торф высокой степени разложения. При воздействии соляной кислотой торф вскипает с поверхности. На глубине 30–40 см в торфяной залежи появляются участки, цементированные травертиновыми новообразованиями. Уровень болотных вод изменяется от 15–20 см у подножия склонов долины до 0 см в мочажинах и по мере приближения к руслу реки.

Таблица 2. Содержание химических элементов в родниковых водах долины р. Бордянки

Table 2. Content of chemical elements in the spring waters of the Bordyanka River valley

Показатель Feature	Ед. измер. Units	Таловские чаши [4] Talovskie chashi [4]	Звездный ключ [4] Zvezdny kluch [4]	Пункты отбора проб (табл. 1, рис. 3) Sampling points (table 1, fig. 3)								
				P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6	P-7	P-8	P-9
222Rn	Бк/л Bq/l	-	-	-	-	-	-	30	-	-	2	2-7
pH		7,29	7,46	7,7	-	-	-	-	-	-	7,5-8,2	7,1-7,4
M'		-	-	582,7	560	-	-	570	-	-	431-479	373-524
HCO ₃ ⁻		-	-	353,6	-	-	-	-	-	-	261,6-290,8	227,6-318,1
SO ₄ ²⁻		10,5	2,96	48,9	-	-	-	-	-	-	36,2-40,2	31,3-44
Cl ⁻		0,66	2,59	30,3	-	-	-	-	-	-	22,9-24,9	19,4-27,2
NO ₂ ⁻		< 0,05	< 0,05	0	-	-	-	-	-	-	0-0,01	0-0,01
NO ₃ ⁻		< 0,05	5,76	0,27	-	-	-	-	-	-	0,7-2,5	0,27-0,84
K		0,53	0,67	0,60	0,66	0,55	0,94	0,64	0,53	0,61	0,54	1,69
Na		15,2	6,16	5,62	5,54	5,15	5,64	5,82	6,73	5,54	5,92	24,13
Mg		26,2	11,5	17,33	18,29	16,50	16,71	18,29	16,61	13,19	14,06	48,8
Ca		134	89,4	111,04	120,63	107,82	109,34	122,79	102,42	91,09	101,58	148,03
Fe		2,6	<2	5,6	11,1	5	181	14,2	141,7	105,2	24,2	219,6
Mn		2620	<1	0,27	0,80	0,30	14,68	1,86	63,26	9,89	11,99	1133
Cu		<5	<5	0,21	4,99	0,48	0,39	0,18	1,47	0,33	0,67	0,77
Zn		18,5	16,1	5,54	17,78	6,18	8,28	5,46	8,17	4,99	221,72	0,89
Pb		<5	<5	0,074	0,102	0,082	0,171	0,067	0,066	0,074	0,121	0,024
Ni		10,7	6,6	3,97	4,28	3,79	4,07	3,9	3,7	3,1	4,03	7,93
Co		3,2	<1	0,779	0,768	0,669	0,628	0,601	0,489	0,415	0,444	4,37
V		<5	<5	0,862	0,954	1,10	1,17	0,618	0,322	0,116	0,555	0,326
Mo		<5	<5	0,401	0,274	0,288	0,387	0,369	0,377	0,583	0,56	2,1
Cd		<0,5	<0,5	0,002	0,002	0,001	0,003	0,002	0,001	0,002	0,001	0,003
Cr		<2	<2	2,12	1,657	1,537	0,779	3,211	0,007	0,007	0,136	0,75
Ag		<5	<5	0,024	0,043	0,043	0,046	0,058	0,067	0,065	0,062	0,024
Be		<1	<1	0,010	0,017	0,017	0,035	0,017	0,022	0,006	0,013	0,001
Sb		<5	<5	0,066	0,062	0,053	0,059	0,062	0,061	0,034	0,025	-

Примечание: * – Минерализация.

Note: * – Mineralization.

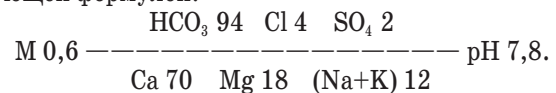
Природные ресурсы долины р. Бордянки и их использование

Природные условия района исследований обусловили наличие здесь двух видов природных ресурсов, имеющих традиционное потребительское значение в народно-хозяйственном комплексе Томской области. Во-первых, это подземные воды, выходящие на дневную поверхность в виде многочисленных родников, во-вторых, специфические органо-минеральные отложения, формирующиеся в условиях богатого грунтового питания и относящиеся к категории «агросырье».

Подземные воды данного района Томска используются в процессе функционирования и осуществления лечебно-оздоровительной деятельности Центра реабилитации «Ключи» при надлежащем контроле качества потребляемой воды. Вода непосредственно из родников широко используется населением. Потребители обычно уверены в ее целебных свойствах и качестве, хотя санитарное

состояние мест выхода родников не всегда является удовлетворительным. Наиболее популярен источник «Аннушкин ключ», из которого берут воду не только окрестные дачники, отдыхающие и коренные жители пос. Ключи, но и специально приезжающие сюда томичи. Вода с характерным привкусом железа и превышением ПДК (более чем в 10 раз) по марганцу.

Состав и свойства подземной воды палеозойского горизонта, используемой в Центре реабилитации «Ключи», детально исследовались в лаборатории Томского НИИ курортологии и физиотерапии. Данная вода квалифицирована как холодная, пресная, по составу гидрокарбонатная кальциевая со слабощелочной реакцией водной среды. Основной ионно-солевой состав воды выражается следующей формулой:



В ней присутствует кремниевая кислота, в достаточных количествах выступающая как биологически активный компонент питьевых минеральных вод. Содержание ее в большинстве исследованных проб изменяется в пределах от 23,4 до 36 мг/дм³ при бальнеологической норме 50,0 мг/дм³.

Тем не менее, этот факт заслуживает особого внимания, поскольку позволяет подчеркнуть особенность данной воды и область ее целесообразного применения. Учитывая специфическую роль бальнеологических кондиций (не менее 50 мг/дм³) метакремниевой кислоты в лечении заболеваний желудочно-кишечного тракта, мы отмечаем ее пригодность для лечения и профилактики данного рода заболеваний. Активная роль малых концентраций кремниевой кислоты в биологическом действии слабоминерализованных вод доказана экспериментально и принимается во внимание при обосновании качества природных лечебно-оздоровительных факторов в ряде санаторно-курортных учреждений на юге Западной Сибири.

В соответствии с классификацией минеральных вод по ГОСТ Р 54316–2011 вода из подземного водозабора Центра реабилитации «Ключи» может рассматриваться как природная минеральная питьевая столовая. Она обладает уникальными свойствами: снижает уровень холестерина, глюкозы в крови, оказывает защитное действие на слизистую желудка [1]. Ее также можно использовать как столовый напиток без ограничений. Концентрация растворимых органических веществ в воде менее 3 мг/дм³ по $C_{орг}$, что не превышает норм ПДК для питьевых минеральных вод.

По данным мониторинговых исследований, санитарно-бактериологическое состояние воды соответствует нормам ГОСТ Р 51232–98. Токсичные азотсодержащие компоненты (нитраты, нитриты), фтор, фенолы содержатся в допустимых количествах. В разводящие сети Центра реабилитации «Ключи» вода поступает после установки обезжелезивания.

Лечебные свойства родниковой воды в данном районе традиционно связывались с содержанием в ней серебра или с довольно типичным для холодных источников Томска присутствием радона. Наличие радона в родниковых водах издавна привлекало внимание томских ученых [5], обусловило в свое время выполнение специальной оценки запасов радоновых вод в ближайших окрестностях Томска [6], вселяло веру населения в особые свойства родниковой воды и побуждало к действиям по особой охране целебных родников как памятников природы [7, 8].

Существенно высоких концентраций серебра в исследованных нами пробах воды не обнаружено. Причем наиболее высокое содержание серебра отмечается в р. Бордянке и опробованных родниках на ее левом берегу, включая Серебряный ключ (табл. 2). Однако название этого ключа изначально связано отнюдь не с повышенным содержанием серебра, а с белесым цветом карбонатных образова-

ний, отлагающихся в месте его выхода. Тем не менее томские туристические фирмы активно рекламируют экскурсии на Серебряный ключ, позиционируя его как целебный источник с повышенным содержанием серебра.

В отношении присутствия радона-222 в бордянских родниках наши исследования показали, что в результате проведения земляных работ на правобережном склоне долины р. Бордянка выше пос. Ключи источник «Радоновый» исчез. В опробованных родниках содержание радона (табл. 2) значительно ниже бальнеологически значимой нормы для минеральных радоновых вод наружного использования (185 Бк/л), соответствует нормативам СанПиН 2.1.4.1074–1 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды» и безопасна для внутреннего потребления.

Наиболее высокие показатели удельной активности 222Rn отмечены в фонтанирующем источнике в верховьях р. Бордянки (табл. 1, 2). В системе Аннушкина ключа у Центра реабилитации «Ключи» содержание радона-222 изменяется от 2 Бк/л в родниках, бьющих в верхней части склона, до 7 Бк/л в каптированном источнике у его подножия.

Несмотря на низкий уровень содержания радона в наиболее популярных родниках по р. Бордянке, интерес к обнаружению в этом районе радоновых, а также углекислых лечебно-минеральных вод, формирующихся в глубинных слоях, по-прежнему сохраняется. В той связи здесь необходимы дополнительные исследования, включая геофизические изыскания.

Органо-минеральные отложения в долине р. Бордянке представляют северный участок Ключевского месторождения травертинов и торфяно-травертиновых смесей (рис. 4). Меньший по площади южный участок находится выше по течению р. Басандайки, примыкая к южной окраине д. Писарево. Месторождение характеризуется следующими параметрами [9]:

- длина 2000 м;
- ширина 150 м;
- толщина 3 м;
- содержание CaCO₃ 75 %;
- запасы агросырья 1000 тыс. т;
- запасы известкового материала 750 тыс. т.

При относительной невысокой средней мощности сформировавшихся здесь карбонатных отложений геоморфологические условия их залегания определяют наличие углублений минерального ложа, заполненных слоями торфа, травертина и торфяно-травертиновой смеси. Так, в пределах контура открытого тростникового болота в верховьях р. Бордянки суммарная мощность карбонатных отложений достигает 6–8 м.

Причем пласты торфа и торфяно-травертиновой смеси в общей залежи карбонатных пород имеют подчиненное значение [9], однако условия их залегания достаточно разнообразны. Они отмечаются как непосредственно с поверхности, нака-

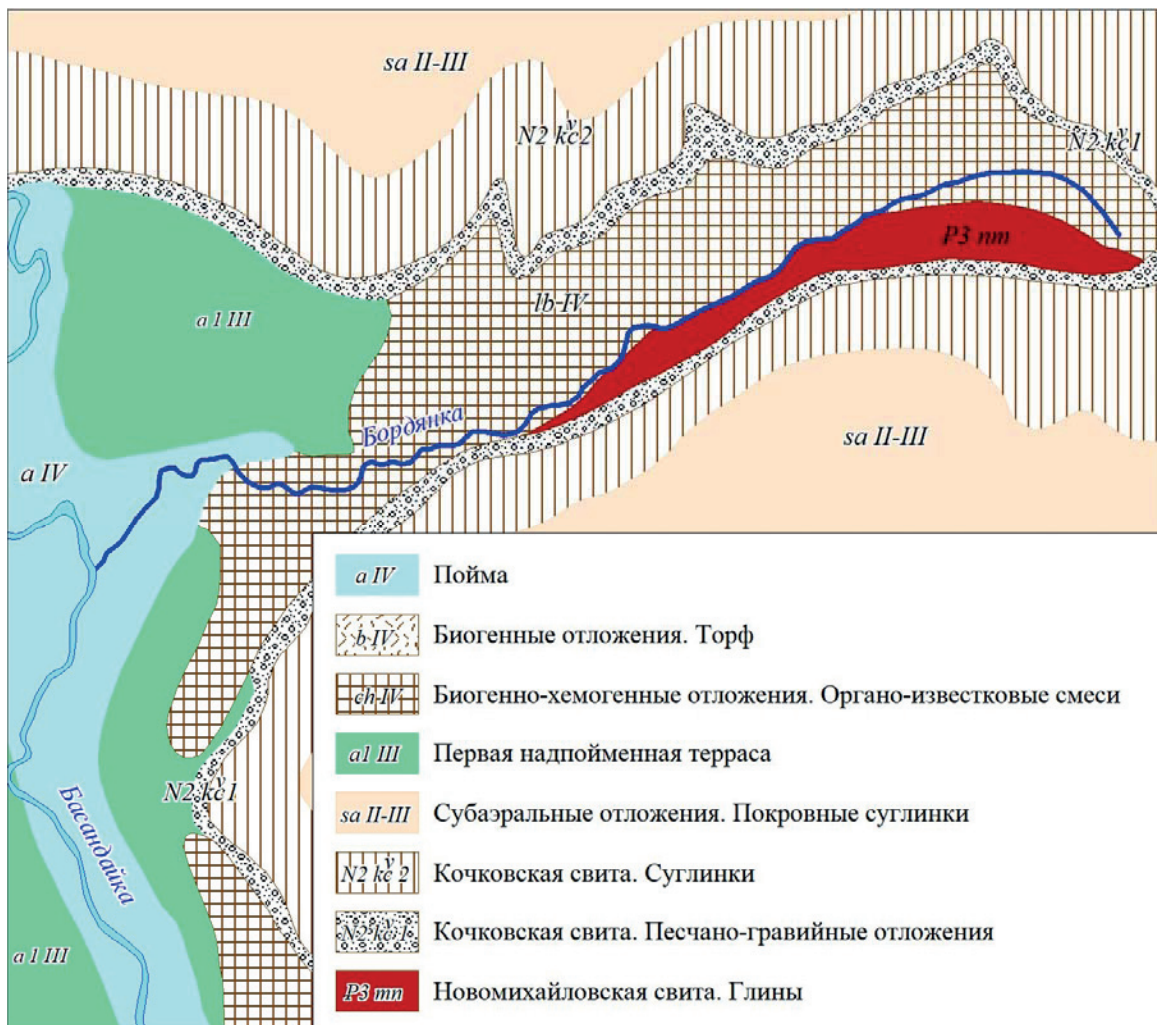


Рис. 4. Особенности геологического строения района исследований [9]

Fig. 4. Specific characteristics of geological structure of study area [9]

пливаясь в углублениях «травертинового» ложа, так и в его основании, залегая на поверхности глинистых отложений новомихайловской свиты или надпойменно-террасового комплекса. На отдельных участках их мощность является весьма существенной. В частности, мощность насыщенного карбонатами торфяника, сформировавшегося в углублении «травертинового» ложа в пределах открытого тростникового болота в верховьях р. Бордянки, превышает 6 м.

Высокий полезный выход карбонатного материала и его качество давно определяли интерес к разработке данного месторождения. Причем сфера применения карбонатного сырья рассматривалась достаточно широко. Еще исследованиями 40-х гг. прошлого столетия отмечалось, что «писаревские» известковые туфы представляют собой материал, позволяющий при правильном обжиге давать известь высокого качества.

Условия залегания и небольшой объем вскрыши позволяют разрабатывать месторождение карьерным способом. Дренаж представляется лег-

ко осуществимым при обработке карбонатных пластов с нижних участков.

В долинах мелких речек, как в случае с долиной р. Бордянки, залежи агросырья заполняют участки расширения и углубления долин. Есть мнение [9], что выбрав торф и органо-известковые отложения, можно улучшить сток или сделать пруд на месте отработанной залежи, чтобы облагородить ландшафт. Отсюда рациональным представляется извлечение полезных запасов даже находящегося в зоне отдыха Ключевского месторождения травертинов и торфяно-травертиновых смесей. После его отработки можно создать искусственный ландшафт, привлекательный для отдыхающих [9].

Принципиальные экологические ограничения природопользования

Эксплуатация торфяных месторождений различного качества и состояния, как правило сопряженная с большими нарушениями в природной среде, в последние годы осуществляется в обстановке уве-

личения интереса к сохранению торфяников и потенциальных конфликтов между местными экономическими потребностями и природоохранными инициативами [10]. Проблема восстановления нарушенных торфяников, несмотря на как минимум столетний опыт решения, остается важной экологической проблемой во всем мире [11], особенно если речь идет о реставрации специфической флоры болот и сохранении их биоразнообразия [12].

В этой связи отработка залежей известкового агросырья Ключевского месторождения, безусловно, будет иметь определенные экологические последствия. Отсутствие сколько-нибудь положительного опыта рекультивации отработанных месторождений агросырья в Томской области вызывает опасения, что эти последствия в данном случае могут стать непоправимыми.

Положение усугубляется сложным расчлененным рельефом и высокой обводненностью участка. Особое опасение нежелательных последствий коренной трансформации ландшафта в случае извлечения ресурсов Ключевского месторождения вызывает его непосредственное соседство с крупным санаторно-оздоровительным комплексом Томска и традиционное использование данного района в целях рекреационно-оздоровительной деятельности и дачного строительства.

Участок Ключевского месторождения травертинов и торфяно-травертиновых смесей, приуроченный к долине р. Бордянки, – естественный заболоченный ландшафт, препятствующий сплошной застройке и освоению территории. Общее переувлажнение и накопление здесь известкового материала связано с разгрузкой глубинных трещинно-жильных подземных вод и водоносного горизонта песчано-гравийно-галечниковых отложений нижней подсвиты кочковской свиты, чему благоприятствует трапециобразная форма долины с плоским дном и достаточно крутыми бортами.

Правый борт долины р. Басадайки, где сформировалось Ключевское месторождение травертинов и торфяно-травертиновых смесей (рис. 3), является примером наиболее интенсивного накопления известкового материала в долинах малых рек на западном макросклоне Томь-Яйского междуречья [9]. Таким образом, долина р. Бордянки – это своего рода памятник природы, отражающий характерные черты развития региона в голоцене.

В целом хорошая сохранность территории позволяет рассматривать ее как экологический буфер для развития санаторно-курортной зоны «Ключи» и формирования здесь специализированной лечебно-оздоровительной местности с выполнением соответствующего благоустройства, включая благоустройство в зонах выхода родников. Родники обычно воспринимаются как уникальные туристические ресурсы [13, 14], которые всегда увеличивают конкурентное преимущество и привлекательность расположенных по соседству оздоровительных учреждений для разных возрастных групп отдыхающих.

Ландшафтные особенности расположения профилактических и санаторных учреждений были и остаются важным фактором успешности лечения и оздоровления. Современные проблемы здоровья, во многом обусловленные следствием негативных для природы и человека процессов урбанизации, требуют более активного взаимодействия со свежим воздухом и повышают терапевтическую ценность природного ландшафта [15] и зеленых насаждений в зонах отдыха [16].

Центр реабилитации «Ключи» является достаточно популярным в Сибири учреждением санаторно-курортного типа во многом именно благодаря удобному транспортно-географическому расположению, ландшафтным достоинствам собственной территории и необычайной красоте окрестных пейзажей. Дальнейшее уплотнение застройки в его ближайшем окружении приведет к превращению его в типичное оздоровительное учреждение урбанизированных зон с ограниченными возможностями отдыхающих в общении с природой, где контакт с природой осуществляется, как правило, косвенно посредством просмотра пейзажей через окно, что является уделом общения с природой жителей современных европейских городов [17].

Долина р. Бордянки – это уникальный природный комплекс, заслуживающий особой охраны на областном уровне. Данная местность с символическим названием «Ключи» очень живописна. В рельефе преобладают склоновые поверхности с выходами многочисленных родников и разнообразной растительностью: лугово-степной, лесо-луговой, таежной, болотной. Здесь зарегистрировано около 250 видов высших сосудистых растений, из которых 23 вида относятся к категории редких и исчезающих. По разнообразию местообитаний, флористическому богатству и насыщенности редкими видами рассматриваемая территория является уникальной в ботанико-географическом отношении не только для Томска, но для области в целом [18].

Таким образом, сказанное выше свидетельствует в пользу сохранения естественного ландшафта и традиционного природопользования в окрестностях пос. Ключи в южном пригороде г. Томска, ограничения застройки и дальнейшей трансформации территории, реализации ее научного и информационно-познавательного потенциала, поддержания и развития путем специального благоустройства и организационных мер ее рекреационных и оздоровительных функций.

Практика показывает [19], что изменения в использовании экосистем, наряду с гидрологическими изменениями и урбанизацией водосбора, являются основными причинами трансформации водно-болотных угодий в городской среде. Однако, несмотря на принципиальную сложность управления водно-болотными угодьями в селитебных зонах, наиболее ценные по каким-либо причинам водно-болотные угодья становятся объектами комплексной территориальной охраны природы и не

только в сибирских городах, как например в Омске, но и в крупных европейских столицах [20]. В этой связи Томск, обладающий уникальным потенциалом своих водно-болотных угодий, также нуждается в обеспечении охраны и рационального использования наиболее ценных из них, особенно находящихся в условиях антропогенного прессинга при сохранении традиционных потребительских и хозяйственных функций [8].

Заключение

1. Склон водораздельной равнины между р. Басандайкой и автодорогой Томск–Богашево – живописная пересеченная местность, имеющая особое природоохранное, научное, эстетическое и рекреационно-оздоровительное значение.
2. В углублениях многочисленных логов и долин притоков р. Басандайки формируются современные болотные отложения, в местах разгрузки подземных вод, обозначенных многочисленными родниками, отлагаются травертины.
3. Примером интенсивного накопления высокоизвестковистых торфов и травертинов является долина р. Бордянки – притока р. Басандайки у Центра реабилитации «Ключи».
4. Река формируется за счет выхода большого количества ключей у подножия коренного склона и является важным функциональным элементом местного ландшафта.
5. Долина реки Бордянки – уникальный ландшафтный, структурно-тектонический и гидрогеохимический памятник мозаичного сочетания восходящей локально-очаговой (Серебряный ключ), локально-точечной (Аннушкин

родник) и линейной (вдоль обнажения верхнего водоносного горизонта в верховьях реки) разгрузки глубинных подземных вод, сопровождающейся повсеместным травертинообразованием.

6. Процесс формирования торфяно-известковых отложений в долине р. Бордянки имеет большой научно-прикладной и информационно-познавательный интерес.
7. Возможность обнаружения здесь радоновых и углекислых лечебно-минеральных вод существенно повышает бальнеологическую и туристско-рекреационную привлекательность данного района.
8. Многолетние наблюдения за химическим составом воды родников подтверждают хорошую сохранность ее природного качества, однако современная интенсивная урбанизация территории в окрестностях Центра реабилитации «Ключи» вызывает опасения.
9. Природный комплекс долины реки Бордянки заслуживает особого внимания и охраны на региональном уровне.
10. В контексте рекреационного благоустройства и планирования территории в первую очередь необходимо обустроить все ключи, используемые населением, проложить к ним удобные тропиновые пути и разработать маршрут кольцевого лечебно-оздоровительного терренкура с выходом на территорию Центра реабилитации «Ключи».

Исследования проводились при поддержке Программы повышения конкурентоспособности Томского госуниверситета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключи: Центр реабилитации. URL: <http://kluchi.tom.ru/about> (дата обращения: 03.03.2017).
2. Карандашев В.К., Орлова Т.А., Лежнев А.Е. Определение элементного состава природных и питьевых вод методом ICP-MS. Методика количественного химического анализа. – М.: Изд-во ВИМС, 2006. – 40 с.
3. Лепокурова О.Е. Геохимия подземных вод севера Алтае-Саянского горного обрамления, формирующих травертины: дис... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2005. – 151 с.
4. Парначёв В.П., Архипов А.Л. О некоторых геохимических особенностях подземных родниковых вод окрестностей города Томска // Роговские чтения: Проблемы инженерной геологии, гидрогеологии и геоэкологии урбанизированных территорий. Всероссийская конференция с международным участием, посвященная 85-летию со дня рождения профессора Г.М. Рогова. – Томск: Изд-во Томского архитектурно-строительного университета, 2015. – С. 49–51.
5. Орлова М.П. Некоторые известковые и радиоактивные источники окрестностей г. Томска // Известия Томского государственного университета. – 1925. – Т. 76. – С. 353–365.
6. Нуднер В.А., Смоленцев Ю.К. Геология и минеральные воды долины р. Ушайки. Отчет о работах партии № 73, проведенных в 1953–56 гг. на месторождении минеральных вод долины р. Ушайки. Т. 1. – Томск: Томская комплексная экспедиция, 1957. – 90 с.
7. Природоохраняемые территории и объекты Томской области: Материалы для разработки разделов «Охрана природы» в ТЭО хозяйственных проектов / Ю.А. Львов, В.В. Хахалкин, Н.Я. Несветайло, Н.М. Семенова. – Томск: Изд-во НИИ биологии и биофизики при Томском гос. университете, 1985. – 39 с.
8. Исследование и охрана радоновых источников в окрестностях г. Томска / Н.М. Семенова, А.Д. Назаров, Н.Г. Сидорина, П.П. Тишин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 7. – С. 22–34.
9. Макаров Г.Я., Ковалева Л.А. Оценка перспектив и прогнозных запасов пресноводного известковистого сырья в зоне интенсивного сельскохозяйственного освоения Томской области. – Томск: Томская геологоразведочная экспедиция, 1990. – 209 с.
10. Peat extraction, conservation and the rural economy in Northern Ireland / M. Cruickshank, R. Tomlinson, D. Bond, P. Devine, C. Edwards // Applied Geography. – 1995. – V. 15. Iss. 4. – P. 365–383.
11. Parry L.E., Holden J., Chapman P.J. Restoration of blanket peatlands // Journal of Environmental Management. – 2014. – V. 133. – P. 193–205.
12. Woziwoda B., Kopec D. Afforestation or natural succession? Looking for the best way to manage abandoned cut-over peatlands for biodiversity conservation // Ecological Engineering. – 2014. – V. 63. – P. 143–152.

13. Chen K.-H., Liu H.-H., Chang F.-H. Essential customer service factors and the segmentation of older visitors within wellness tourism based on hot springs hotels // *International Journal of Hospitality Management*. – 2013. – V. 35. – P. 122–132.
14. Пойда-Носик Н.Н., Грабар М.В. Туристично-рекреаційна спеціалізація регіону // *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Економіка»*. – 2015. – Випуск 2 (46). – С. 149–153.
15. Grose M.J. Landscape and children's health: Old natures and new challenges for the preventorium // *Health & Place*. – 2011. – V. 17. – Iss. 1. – P. 94–102.
16. Dzhambov A.M., Dimitrova D.D. Elderly visitors of an urban park, health anxiety and individual awareness of nature experiences // *Urban Forestry & Urban Greening*. – 2014. – V. 13. – Iss. 4. – P. 806–813.
17. The rarity of direct experiences of nature in an urban population / D.T.C. Cox, H.L. Hudson, D.F. Shanahan, R.A. Fuller, K.J. Gaston // *Landscape and Urban Planning*. – 2017. – V. 160. – P. 79–84.
18. Семенова Н.М., Амельченко В.П., Волкова И.И. Ботанико-географические особенности и перспективы сохранения уникального природного комплекса в южном пригороде г. Томска // *Проблемы региональной экологии*. – 2015. – № 6. – С. 49–54.
19. The eco-social transformation of urban wetlands: a case study of Colombo, Sri Lanka / M. Hettiarachchi, T.H. Morrison, D. Wickramasinghe, R. Mapa, De Alwis Ajith, C.A. McAlpine // *Landscape and Urban Planning*. – 2014. – V. 132. – P. 55–68.
20. Arguments for Integrative Management of Protected Areas in the Cities – Case Study in Bucharest City / G. Manea, E. Matei, I. Viulie, L. Tirlă, R. Cuculici, O. Cocos, A. Tişcovschi // *Procedia Environmental Sciences*. – 2016. – V. 32. – P. 80–96.

Поступила 18.08.2017 г.

Информация об авторах

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

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

Лойко С.В., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды Томского государственного университета.

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

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

UDK 502.51 (571.16)

TATUS AND PROSPECTS OF USING THE HEALTH IMPROVEMENT AREA «KLYUCHI» (TOMSK REGION)

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

Alexander D. Nazarov²,
nazarov@tpu.ru

Sergey V. Loyko¹,
s.loyko@yandex.ru

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

Platon A. Tishin¹,
tishin_pa@mail.ru

¹ Tomsk State University,
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia,

² Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia, Tomsk State University,
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia,

³ Tomsk Research Institute of health resorts and physiotherapy,
7, Rosa Luxembourg street, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: resurs@niikf.tomsk.ru

Since its foundation the city of Tomsk conquered its contiguous territories defining their functional purpose and prospects of use. When required such former suburban territories were attached to extend the city's boundaries.

In XIX century in the woodlands around Tomsk, especially in the western and southern periphery, a great number of summerhouses sprung up. The contemporary development of Tomsk touched upon traditional leisure areas of people of Tomsk including free and organized recreational activities and caused a whole set of social and environmental issues. The greatest impact is expected to be seen in the areas of high concentration and extensive use of recreational and health-related resources that are subject to influence of fierce competition between conventional small-scale cultivation and land use and exclusive villa development. An example could be a territory on the outskirts of the old health and recreation center of Tomsk located in the recreation and summerhouses area near the village «Klyuchi».

Due to the intensive development of neighboring territories the health and recreation center is losing its connection with the environment. There is the issues relating to preservation of natural waters of well springs and the unique reed swamp that is key to the local environmental skeleton frame and the main obstacle to full development of the area.

The main aim of study is to analyze the conditions, traditions and opportunities of using health and recreation natural resources of the outskirts of Tomsk and to carry out the full-scale geoeological assessment of the unique swamp area on the outskirts of the village «Klyuchi».

The methods used in the study: drawing on geographical data and normative documentation that define status of development and environment in the village «Klyuchi»; landscape and geobotanical surveys; probing of organic and mineral deposits in the valley of the river Bordyanka; mapping and sampling of springs along the river Bordyanka; physicochemical and radiological observations of spring waters.

The results. The authors have defined the features of natural resources of the Bordyanka river valley and prospects of their use. The paper introduces the results of analysis of traditionally used spring waters. The unique environmental character of the territory was validated. The authors considered the opportunities of establishing health and recreation territory at the rehabilitation center «Klyuchi» on the southern outskirts of Tomsk.

Key words:

Springs, travertine, wetlands, natural mineral water, radon waters, specially protected areas, health-improving areas, village «Klyuchi», Tomsk city.

Research and investigations were supported by «The Tomsk State University competitiveness improvement programme».

REFERENCES

1. *Klyuchi: Tsentr reabilitatsii* [Klyuchi: Rehabilitation Center]. Available at: <http://kluchi.tom.ru/about> (accessed: 03.03.2017).
2. Karandashev V.K., Orlova T.A., Lezhnev A.E. *Opredelenie elementnogo sostava prirodnykh i pitevykh vod metodom ICP-MS. Metodika kolichestvennogo khimicheskogo analiza* [Determination of the elemental composition of natural and drinking water by ICP-MS. Methods of quantitative chemical analysis]. Moscow, 2006. 40 p.
3. Lepokurova O.E. *Geokhimiya podzemnykh vod severa Altae-Sayanskogo gornogo obramleniya, formiruyushchikh travertiny*. Dis. Kand. nauk. [Geochemistry of underground waters of the Altai-Sayan mountain range forming travertine. Cand. Diss.]. Tomsk, 2005. 151 p.

4. Parnachev V.P., Arkhipov A.L. O nekotorykh geokhimicheskikh osobnostyakh podzemnykh rodnikovyykh vod okrestnostey goroda Tomsk [On certain geochemical properties of underground spring water of the suburbs of Tomsk]. *Problemy inzhenernoy geologii, gidrogeologii i geoekologii urbanizirovannykh territoriy. Materialy Vserossiyskoy konferentsii* [Issues of engineering geology, hydrogeology and geoecology of developed territories. Proceedings of a pan-Russian conference]. Tomsk, Tomsk State University of Architecture and Building Publ., 2015. pp. 49–51.
5. Orlova M.P. Nekotorye izvestkovye i radioaktivnye istochniki okrestnostey g. Tomsk [Certain calcareous and radioactive springs on the outskirts of Tomsk]. *Tomsk State University Journal*, 1925, vol. 76, pp. 353–365.
6. Nudner B.A., Smolentsov Yu.K. *Geologiya i mineralnye vody doliny reki Ushayki. Otchet o rabotakh partii no. 73, provedennykh v 1953–1956 na mestorozhdenii mineralnykh vod doliny reki Ushayki* [Geology and mineral waters of the valley of the Ushaika river. Field work report of crew no. 73 in 1953–1956 on the mineral water field of the valley of the Ushaika river]. Tomsk, 1957. Vol. 1, 90 p.
7. Lvov Yu.A., Khakhalkin V.V., Nesvetaylo N.Ya., Semenova N.M. *Priridookhranyaemye territorii i obekty Tomskoy oblasti: Materialy dlya razrabotki razdelov «Okhrana prirody» v TEO khozyaystvennykh proektov* [Nature protected areas of Tomsk oblast: Materials for development of «Environmental protection» sections of project TEOs]. Tomsk, Research Institute of Biology and Biophysics Publ., 1985. 39 p.
8. Semenova N.M., Nazarov A.D., Sidorina N.G., Tishin P.A. Study and protection of radon springs on the neighbor of Tomsk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 7, pp. 22–34. In Rus.
9. Makarov G.Ya., Kovaleva L.A. *Otsenka perspektiv i prognoznnykh zapasov presnovodnogo izvestkovistogo syrya v zone intensivnogo selskokhozyaystvennogo osvoeniya Tomskoy oblasti* [Estimation of prospects and predicted reserves of freshwater calcareous raw materials in the zone of intensive agricultural development of the Tomsk region]. Tomsk, Tomskaya geologorazvedochnaya ekspeditsiya Publ., 1980. 209 p.
10. Cruickshank M., Tomlinson R., Bond D., Devine P., Edwards C. Peat extraction, conservation and the rural economy in Northern Ireland. *Applied Geography*, 1995, vol. 15, Iss. 4, pp. 365–383.
11. Parry L.E., Holden J., Chapman P.J. Restoration of blanket peatlands. *Journal of Environmental Management*, 2014, vol. 133, pp. 193–205.
12. Woziwoda B., Kopeć D. Afforestation or natural succession? Looking for the best way to manage abandoned cut-over peatlands for biodiversity conservation. *Ecological Engineering*, 2014, vol. 63, pp. 143–152.
13. Chen K.-H., Liu H.-H., Chang F.-H. Essential customer service factors and the segmentation of older visitors within wellness tourism based on hot springs hotels. *International Journal of Hospitality Management*, 2013, vol. 35, pp. 122–132.
14. Poyda-Nosik N.N., Grabar M.V. Turistichno-rekreatsiyna spetsializatsiya regionu [Tourist and recreational specialization of the region]. *Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Series «Economics»*, 2015, Iss. 2 (46), pp. 149–153. In Ukraine.
15. Grose M.J. Landscape and children's health: Old natures and new challenges for the preventorium. *Health & Place*, 2011, vol. 17, Iss. 1, pp. 94–102.
16. Dzhambov A.M., Dimitrova D.D. Elderly visitors of an urban park, health anxiety and individual awareness of nature experiences. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2014, vol. 13, Iss. 4, pp. 806–813.
17. Cox D.T.C., Hudson H.L., Shanahan D.F., Fuller R.A., Gaston K.J. The rarity of direct experiences of nature in an urban population. *Landscape and Urban Planning*, 2017, vol. 160, pp. 79–84.
18. Semenova N.M., Amelchenko V.P., Volkova I.I. Botanical and geographical peculiarities and preservation prospects for a unique natural landscape located in the southern suburb of the city of Tomsk. *Problemy regionalnoy ekologii – Regional Environmental Issues*, 2015, no. 6, pp. 49–54. In Rus.
19. Hettiarachchi M., Morrison T.H., Wickramasinghe D., Mapa R., De Alwis Ajith, McAlpine C.A. The eco-social transformation of urban wetlands: A case study of Colombo, Sri Lanka. *Landscape and Urban Planning*, 2014, vol. 132, pp. 55–68.
20. Manea G., Matei E., Vijulie I., Tirlă L., Cuculici R., Cocos O., Tîșcovschi A. Arguments for Integrative Management of Protected Areas in the Cities – Case Study in Bucharest City. *Procedia Environmental Sciences*, 2016, vol. 32, pp. 80–96.

Received: 18 August 2017.

Information about the authors

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

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

Sergey V. Loyko, Cand. Sc., senior researcher, Tomsk State University.

Natalya G. Sidorina, head of the Laboratory, Tomsk Research Institute of health resorts and physiotherapy.

Platon A. Tishin, Cand. Sc., head of the analytical center, Tomsk State 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 27.09.2017. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 16,28. Уч.-изд. л. 14,73.
Заказ xxx-17. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ