

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 328, № 3, 2017

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА.
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Редакционная коллегия

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

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

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2017

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

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

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

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

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

- Прогнозирование и разведка георесурсов
- Добыча георесурсов
- Транспортировка георесурсов
- Глубокая переработка георесурсов
- Энергоэффективное производство и преобразование энергии на основе георесурсов
- Безопасная утилизация георесурсов и вопросы геоэкологии
- Инженерная геология Евразии и окраинных морей.

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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

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

Volume 328, № 3, 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

- 6** **Прогнозирование кадастровой стоимости земель моногородов с помощью регрессионной модели**
Ковязин В.Ф., Лепихина О.Ю., Зимин В.П.
- 14** **Абсолютный возраст, петрология, геохимия и рудоносность Точильного штока Горного Алтая**
Гусев А.И., Гусев Н.И., Табакаева Е.М.
- 27** **Химический состав атмосферных осадков Российского Заполярья**
Семенец Е.С., Свистов П.Ф., Талаш А.С.
- 37** **Возможности георадарного метода при обследовании подпорных стен и ограждающих конструкций**
Фоменко Н.Е., Гапонов Д.А., Капустин В.В., Попов В.В., Фоменко Л.Н.
- 46** **Методика автоматического детектирования компонент объектов захоронения отходов по космическим изображениям**
Казарян М.Л., Рихтер А.А., Шахраманьян М.А.
- 54** **Содержание металлов в воде р. Енисей на участке от г. Красноярска до устья р. Ангара в 2010–2015 гг.**
Деметьев Д.В., Болсуновский А.Я., Борисов Р.В., Александрова Ю.В.
- 64** **Расчет нагрузочной способности полуобкатной плоскоконической передачи приводов запорной арматуры**
Сызранцев В.Н., Пазяк А.А.
- 75** **Стратегия управления электротехническим комплексом механизированной добычи нефти на основе экономического критерия**
Букреев В.Г., Сипайлова Н.Ю., Сипайлов В.А.
- 85** **Оценка параметров разрушающей нагрузки при ударно-волновом нагружении для ответственных строительных конструкций сооружений нефтегазового комплекса**
Однокопылов Г.И., Саркисов Д.Ю.
- 96** **Экологические и биомониторинговые исследования ртути в Крымском регионе**
Евстафьева Е.В., Барановская Н.В., Тымченко С.Л., Богданова А.М., Нараев Г.П., Сологуб Н.А., Наркович Д.В.
- 106** **Метод каппаметрии как прогнозно-поисковый критерий золотого оруденения**
Гаврилов Р.Ю., Синкина Е.А., Мицых С.Н.
- 6** **Prediction of cadastral value of land in a single-industry town by the regression model**
Kovyazin V.F., Lepikhina O.Yu., Zimin V.P.
- 14** **Absolute age, petrology, geochemistry and ore mineralization of Tochilny stock in Gorny Altai**
Gusev A.I., Gusev N.I., Tabakaeva E.M.
- 27** **Chemical composition of atmospheric precipitation in Russian Subarctic**
Semenets E.S., Svistov P.F., Talash A.S.
- 37** **Opportunities of ground penetrating radar at searching supporting walls and enclosing constructions**
Fomenko N.E., Gaponov D.A., Kapustin V.V., Popov V.V., Fomenko L.N.
- 46** **Method of automatic detecting the components of waste disposal objects by space images**
Kazaryan M.L., Richter A.A., Shakhramanian M.A.
- 54** **Concentrations of metals in water of the Yenisei river between Krasnoyarsk and the Angara river outfall in 2010–2015**
Demytyev D.V., Bolsunovsky A.Ya., Borisov R.V., Alexandrova Yu.V.
- 64** **Calculating loading capacity of bevel gears with a small shaft angle with a non-generated gear and a generated pinion for drives of stop valves**
Syzrantsev V.N., Pazyak A.A.
- 75** **Control strategy in accordance with economical criterion for electrotechnical installation of mechanized oil production**
Bukreev V.G., Sipaylova N.Yu., Sipaylov V.A.
- 85** **Evaluation of breaking load parameters under shock wave loading for critical constructions of oil and gas sector facilities**
Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu.
- 96** **Environmental and biomonitoring mercury research in the Crimean region**
Evstafeva E.V., Baranovskaya N.V., Tymchenko S.L., Bogdanova A.M., Naraev G.P., Sologub N.A., Narkovich D.V.
- 106** **Method of appletree as prospecting criteria of gold mineralization**
Gavrilov R.Yu., Sinkina E.A., Mitsykh S.N.

УДК 528.44

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАДАСТРОВОЙ СТОИМОСТИ ЗЕМЕЛЬ МОНОГОРОДОВ С ПОМОЩЬЮ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ

Ковязин Василий Федорович¹,
vfkedr@mail.ru

Лепихина Ольга Юрьевна¹,
Olgalepikhina1984@gmail.com

Зимин Виктор Павлович¹,
vic-zim@yandex.ru

¹ Санкт-Петербургский горный университет,
Россия, 199026, Санкт-Петербург, 21-я линия Васильевского острова, 2.

Ввиду нестабильной экономической ситуации в стране для большинства градообразующих предприятий моногородов характерен высокий темп изменения показателей хозяйственной деятельности, что отражается, в частности, на формировании уровня цен на недвижимость. Оценка и прогнозирование влияния хозяйственной деятельности градообразующего предприятия на рыночную и кадастровую стоимость земель моногородов важны при управлении деятельностью отрасли и при исследовании перспектив развития рынка недвижимости моногорода.

Цель работы: создание прогнозной модели кадастровой стоимости земель моногородов с учетом влияния показателей хозяйственной деятельности градообразующих предприятий.

Методы исследования. Построена модель зависимости стоимости земель моногородов от предложенных показателей хозяйственной деятельности градообразующих предприятий, при этом использовался регрессионный анализ. Методом корреляционного анализа выявлены показатели, оказывающие достоверное влияние на стоимость городских земель; методом кластерного анализа проведена классификация моногородов; методом регрессионного анализа построены модели зависимости стоимости земель исследуемых объектов от факторов хозяйственной деятельности градообразующих предприятий (линейная, логарифмическая и регрессия второго порядка). Для каждой из моделей установлены коэффициенты качества, по которым выбрана наилучшая зависимость.

Результаты. По результатам проверки качества и статистической значимости предлагаемых моделей выявлено, что зависимость стоимости земель моногородов от факторов хозяйственной деятельности градообразующих предприятий наилучшим образом описывает линейная регрессионная модель. Также установлено, что на стоимость земель исследуемых моногородов максимально влияют численность населения в моногороде, мощность производства градообразующего предприятия, индекс загрязнения атмосферы в моногороде. Разработанная классификация моногородов Северо-Западного Федерального округа, помимо указанных целей, может быть применена при кадастровой оценке их земель.

Ключевые слова:

Моногород, кадастровая оценка, градообразующее предприятие, кластерный анализ, моделирование, регрессионный анализ.

Введение

Моногорода занимают особое место среди населенных пунктов России в связи с наличием градообразующих предприятий, оказывающих влияние на демографические, социально-экономические, экологические и иные условия, сложившиеся в городе [1].

Для большинства градообразующих предприятий характерен высокий темп изменения показателей хозяйственной деятельности, вызывающий отклик моногорода в целом и рынка недвижимости в частности. Так, по данным риэлтерских агентств, снижение цен на рынке недвижимости, вызванное кризисом 2008–2010 гг., в наибольшей степени коснулось именно моногородов, что свидетельствует о зависимости стоимости городских земель от наличия и результатов хозяйственной деятельности предприятий. Результаты моделирования и прогнозирования данной зависимости важны как для целей принятия решений при управле-

нии деятельностью градообразующего предприятия, так и при оценке перспективного состояния рынка недвижимости моногорода.

Тема современного состояния рынка недвижимости и кадастровой оценки земель в России достаточно широко представлена в научных публикациях, в том числе в публикациях авторов настоящего исследования [2–4].

Определенные работы посвящены вопросу прогнозирования стоимости городских земель [5, 6]. В них подчеркнута важность результатов подобных исследований при управлении земельно-имущественным комплексом и изучении перспективного состояния рынка недвижимости. Однако тщательное изучение библиографии по данной проблеме показало отсутствие исследований, посвященных изучению влияния деятельности градообразующих предприятий на стоимость земель моногородов. Указанное обстоятельство подтверждает актуальность настоящего исследования.

Целью работы является создание прогнозной модели кадастровой стоимости земель моногородов с учетом факторов хозяйственной деятельности градообразующих предприятий. Названная цель достигается путем построения регрессионной модели расчета кадастровой стоимости городских земель, учитывающей факторы хозяйственной деятельности градообразующих предприятий.

Построение подобных моделей осуществляется на основе выборки исследуемых объектов, характеризующейся максимальной однородностью объектов внутри каждой группы [7]. Для целей обеспечения данного условия в работе предложена классификация моногородов, учитывающая важнейшие характеристики населенного пункта и градообразующей отрасли, в наибольшей степени влияющие на стоимость городских земель.

Материалы и методы

Объектом исследования являются земельные участки моногородов Северо-Западного Федерального округа, в состав которых включен 41 населенный пункт, из них 7 городов Архангельской, 4 – Вологодской, 3 – Ленинградской, 7 – Мурманской, 5 – Новгородской области, также 11 городов республики Карелия и 4 – республики Коми. Построение регрессионной модели осуществлено на примере земель, предназначенных для индивидуального жилищного строительства (ИЖС).

На начальном этапе работы проведена классификация объектов исследования по показателям, характеризующим градообразующую отрасль моногородов, оказывающим влияние на стоимость земель в них:

- численность населения в городе, человек;
- удаленность населенного пункта от центра субъекта Российской Федерации, км;
- степень социально-экономического развития города;
- класс опасности градообразующего предприятия [8].

Значения таких факторов, как «численность населения в городе» и «удаленность населенного пункта от центра субъекта Российской Федерации», установлены по данным официальных сайтов администраций городов.

Оценка фактора «Степень социально-экономического развития» проведена на основе распоряжения Правительства РФ [9], которое разделяет моногорода по социально-экономическим условиям на три категории:

- с наиболее сложным социально-экономическим положением;
- с наличием рисков ухудшения социально-экономического положения;
- со стабильной социально-экономической ситуацией.

При определении показателя «Класс опасности градообразующего предприятия» использованы «Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы» [10], согласно которым предприятия по-

дразделяются по условиям и характеру производства на 5 классов с учетом степени воздействия на окружающую среду и здоровье человека.

Построение классификации по предложенным факторам осуществлено путем кластерного анализа, преимуществом которого является отсутствие необходимости в обучающей выборке [11, 12].

При группировке моногородов использован метод «объединение (древовидная кластеризация)» [13, 14], выбор которого обоснован возможностью оценщика проследить процесс кластеризации и на его основе определить необходимое количество групп. Преимуществом данного способа является то, что он не требует заранее известного числа кластеров [15, 16]. После определения необходимого количества групп моногородов осуществлена проверка полученного результата методом «К-средних».

При проведении кластерного анализа особое внимание уделялось размерности и масштабу задаваемых характеристик. Значения факторов группировки должны быть однородными и безразмерными [13], для чего значения учитываемых характеристик стандартизировались посредством используемого программного продукта – пакета анализа *STATISTICA*.

На следующем этапе, на примере одной из сформированных ранее групп, осуществлено построение регрессионной модели кадастровой стоимости земель по параметрам, характеризующим моногород и градообразующую отрасль. Будучи одним из самых распространенных способов массовой оценки при определении кадастровой стоимости земель населенных пунктов, регрессионное моделирование также позволяет решить задачи прогнозирования зависимой величины по влияющим на нее характеристикам [5].

Для целей проведения данного этапа работ осуществлен сбор значений факторов хозяйственной деятельности градообразующих предприятий, оказывающих влияние на стоимость земель моногородов. В качестве таких факторов предложены базовые показатели, характеризующие моногород в целом и деятельность градообразующего предприятия в частности:

- численность населения, чел.;
- количество рабочих мест на градообразующем предприятии, чел.;
- чистая прибыль градообразующего предприятия, млн р.;
- мощность производства градообразующего предприятия, млн т;
- средняя заработная плата на градообразующем предприятии, р.;
- производительность труда на градообразующем предприятии, тыс. т в год/чел.;
- прибыль на одного чел на градообразующем предприятии, тыс. р./чел.;
- индекс загрязнения атмосферы в моногороде;
- суммарный показатель загрязнения почвы в моногороде [17].

Значения показателей получены в рамках одной из сформированных в результате классификации групп за семилетний период, из официальных документов и отчетов, находящихся в общем доступе. Объем выборки составил 30 объектов, и в качестве моделируемой переменной использована средняя рыночная стоимость земель моногородов, предназначенных для размещения ИЖС [18].

В дальнейшем из вышеприведенного перечня показателей с использованием метода корреляционного анализа выявлены значимые, которые приняты для построения регрессионной модели кадастровой стоимости земель [19–21]. В связи с тем, что искомая прогнозная модель основана на моделировании кадастровой стоимости, в качестве значимых, в соответствии с требованиями к проведению кадастровой оценки, приняты факторы, коэффициенты корреляции которых, со средней рыночной стоимостью земель моногорода, превышают значение 0,3 [22]. Также для целей исключения мультиколлинеарности среди анализируемых параметров между ними попарно определены значения коэффициентов частной корреляции. В случае если между двумя факторами возникала сильная связь (коэффициент частной корреляции превышал 0,7), один из них исключался из общей выборки.

На заключительном этапе работы сформированы 3 регрессионные модели (логарифмическая, линейная и регрессия второго порядка), для каждой установлены показатели качества – коэффициенты корреляции и детерминации. По их значениям выбрана наилучшая зависимость, которая в дальнейшем принята за модель прогнозирования кадастровой стоимости земель моногородов по факторам хозяйственной деятельности градообразующих предприятий. При построении моделей использован пакет анализа *STATISTICA*, проверка статистической значимости моделей осуществлена на основе критерия Фишера [7].

Результаты

Результаты сбора значений факторов группировки моногородов, проведенного на начальном этапе исследований, представлены в табл. 1.

С использованием полученных значений данных факторов методом «объединение (древовидная кластеризация)» построено иерархическое древо, отражающее этапы последовательного объединения объектов исследования в группы (рис. 1).

Анализ диаграммы (рисунок) показал четыре отчетливо выраженные группы населенных пунктов, отличных друг от друга по своим характеристикам. После выявления числа групп исследуемых объектов проводился контроль результатов группировки с помощью метода «К-средних». Конечные результаты группировок, проведенных двумя способами, оказались практически идентичными. После их изучения и сопоставления выявлен состав четырех групп моногородов Северо-Западного Федерального округа. Несмотря на то, что моногорода расположены в различных регио-

нах округа, они все имеют одну направленность производства, а также при их классификации учтен фактор удаленности от областного центра.

Таблица 1. Значения факторов группировки моногородов (фрагмент)

Table 1. Values of single-industry town grouping factors (selection)

№	Населенный пункт Settlement	Субъект РФ The Russian Federation subdividing region	Факторы группировки Factors of grouping			
			Численность населения, чел Population in the monoton, person	Удаленность от центра субъекта, км Distance from the center of the region, km	Степень социально-экономического развития Degree of social and economic development	Класс опасности градообразующего предприятия Hazard class of city-forming enterprise
1	пос. Кизема Kizema	Архангельская область Arkhangelsk region	2968	444	1	4
...
21	г. Новодвинск Novodvinsk	Архангельская область Arkhangelsk region	39222	29	2	4
22	г. Сокол Sokol	Вологодская область Vologda region	37562	35	2	4
23	г. Сланцы Slantsy	Ленинградская область Leningrad region	33300	186	2	1
...
41	г. Сясьстрой Syasstroy	Ленинградская область Leningrad region	13305	152	3	4

По результатам анализа состава полученных кластеров сформирована окончательная классификация исследуемых населенных пунктов:

- 1) моногорода с наиболее сложным социально-экономическим положением с неопасным производством. В данную группу входит 13 населенных пунктов: пос. Кизема, г. Онега, г. Красавино, пос. Сазоново, г. Пикалево, пос. Краснофарфорный, г. Пестово, г. Суоярви, г. Кондопога, пос. Муезерский, г. Питкяранта, г. Пудож, г. Емва.
- 2) моногорода со стабильным социально-экономическим положением либо рисками его ухудшения с неопасным производством. Этот кластер представлен 13 моногородами: г. Новодвинск, г. Сокол, г. Заполярный, пос. Парфино, г. Боро-

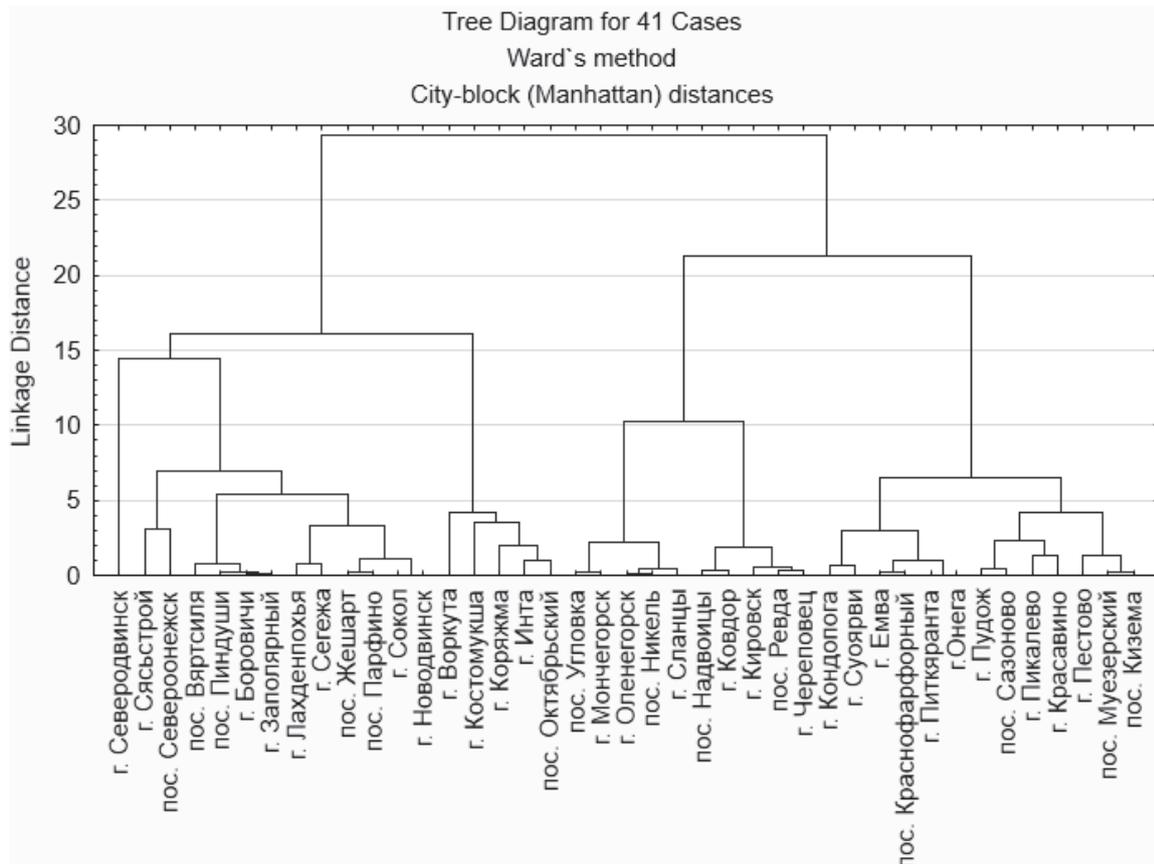


Рисунок. Древоидная диаграмма, результат метода «объединение (древоидная кластеризация)»

Figure. Tree diagram, the result of the method «joining (tree clustering)»

- вичи, г. Сегежа, пос. Пиндуши, г. Лахденпохья, пос. Вяртсиля, пос. Жешарт, г. Северодвинск, г. Сясьстрой, пос. Североонежск.
- 3) моногорода с рисками ухудшения социально-экономического положения, сильно отдаленные (более 450 км) от центра субъекта. Является самой малочисленной по составу и включает в себя следующие города и поселки: пос. Октябрьский, г. Кораяма, г. Костомукша, г. Инта, г. Воркута.
 - 4) моногорода с наиболее сложным социально-экономическим положением либо рисками его развития с опасным производством. В состав данного подразделения входят такие населенные пункты, как: г. Череповец, г. Кировск, г. Ковдор, пос. Ревда, пос. Надвоицы, г. Сланцы, пос. Никель, г. Мончегорск, г. Оленегорск, пос. Угловка.

Дальнейшее исследование проведено на примере моногородов четвертой группы за исключением города Череповец, который целесообразно выделить в отдельную группу ввиду больших размеров и относительно высокой численности населения.

В табл. 2 представлены значения факторов хозяйственной деятельности градообразующих предприятий, оказывающих влияние на стоимость земель моногородов.

По результатам корреляционного анализа выявлены четыре фактора, в наибольшей степени влияющие на стоимость земель моногородов: «Численность населения в моногороде», «Мощность производства градообразующего предприятия», «Индекс загрязнения атмосферы в моногороде», «Количество рабочих мест на градообразующем предприятии». Коэффициенты корреляции данных показателей со значением средней рыночной стоимости земель моногородов равны 0,69, 0,37, -0,32, 0,36 соответственно. Остальные факторы исключены из дальнейших исследований ввиду низкого их влияния на стоимость земель исследуемых объектов. Это подтвердилось низкими значениями коэффициентов корреляции. Так, в наименьшей степени на рынок земель моногородов оказывают влияние такие факторы, как «Чистая прибыль градообразующего предприятия», «Суммарный показатель загрязнения почвы в моногороде», при этом их связь с ценами на земельные участки моногородов характеризуется коэффициентами, равными 0,09 и -0,11 соответственно.

Далее значимые факторы (с коэффициентом корреляции более 0,3) исследовались на мультиколлинеарность. В результате проведенного анализа между факторами «Мощность производства градообразующего предприятия» и «Количество

Таблица 2. Значения факторов, используемых при построении прогнозной модели (фрагмент)

Table 2. Values of factors used to develop a predictive model (selection)

Моногород Monotown	Год сбора данных Year of data collection	Численность населения, чел. Population in a monotown, person	Количество рабочих мест на градообразующем предприятии, чел. Number of work places in a city-forming enterprise, person	Чистая прибыль градообразующего предприятия, млн р. Nett profit of a city-forming enterprise, million rub.	Мощность производства градообразующего предприятия, млн т Capacity of production of a city-forming entity, million tons	Средняя заработная плата на градообразующем предприятии, р. Average wage at a city-forming enterprise, rub	Производительность труда на градообразующем предприятии, тыс. тонн в год/чел Productivity of a city-forming enterprise, thousand tons in year/person	Прибыль на одного чел на градообразующем предприятии, тыс. р./чел. Profit per person at a city-forming enterprise, thousand rub/ person	Индекс загрязнения атмосферы в моногороде Air pollution index in a monotown	Суммарный показатель загрязнения почвы в моногороде Total index of soil contamination in a monotown	Средняя рыночная стоимость 1 кв. м земель под ИЖС в моногороде, р. Average market cost of 1 sq. m of land in a monotown for individual housing construction, rub.
г. Мончегорск Monchegorsk	2009	48062	5080	10226,1	7,90	25706	1,56	2013,01	5,00	4,50	301,7
	2010	45361	5178	8942,2	8,30	28938	1,60	1726,96	5,55	4,70	342,6
	2011	45253	5211	2423,3	8,10	32628	1,55	465,04	5,30	4,82	340,5
	2012	44643	5769	2818,0	7,50	36212	1,30	488,47	5,04	4,11	368,8

г. Оленегорск Olenegorsk	2010	23072	2065	2883,0	4,30	35252	2,08	1396,13	2,00	3,01	405,1
	2011	22986	2154	4826,0	4,40	39800	2,04	2240,48	1,98	2,89	497,7
	2012	22405	2300	2696,0	4,60	44429	2,00	1172,17	1,85	2,46	641,8
	2013	21736	2200	1281,0	4,70	52760	2,14	582,27	1,69	2,71	292,6

рабочих мест на градообразующем предприятии» выявлен достаточно высокий коэффициент частной корреляции, равный 0,95. Это свидетельствует о высокой зависимости данных факторов друг от друга и может привести к ошибкам в процессе дальнейшей работы. В связи с этим фактор «Количество рабочих мест на градообразующем предприятии» исключен из исследования.

Таким образом, выявлены три показателя, по которым осуществлялось построение регрессионных моделей зависимости стоимости земель моногородов от деятельности градообразующего предприятия:

- численность населения в моногороде, чел;
- мощность производства градообразующего предприятия, млн т в год;
- индекс загрязнения атмосферы в моногороде.

По выявленным факторам с использованием пакета анализа STATISTICA построены три регрессионные модели и установлены их показатели качества:

Линейная регрессия

$$Y = 328,581 + 0,006 \cdot X_1 - 4,095 \cdot X_2 - 35,707 \cdot X_3, \\ R = 0,82, R^2 = 0,68. \quad (1)$$

Регрессия второго порядка

$$Y = 336,76 + 0,0001 \cdot X_1^2 - 0,082 \cdot X_2^2 - 7,762 \cdot X_3^2, \\ R = 0,81, R^2 = 0,67. \quad (2)$$

Логарифмическая модель

$$Y = 341,31 + 75,63 \cdot \ln X_1 + \\ + 0,168 \cdot \ln X_2 - 46,67 \cdot \ln X_3, \\ R = 0,74, R^2 = 0,55. \quad (3)$$

где Y – средняя рыночная стоимость 1 м² земель под ИЖС, р.; X_1 – численность населения в моногороде, чел; X_2 – мощность производства градообразующего предприятия, млн т в год; X_3 – индекс загрязнения атмосферы в моногороде; R – коэффициент корреляции регрессионной модели; R^2 – коэффициент детерминации регрессионной модели.

Из результатов регрессионного анализа видно, что максимальные значения коэффициентов корреляции и детерминации характерны для линейной модели (1). Проверка статистической значимости данной зависимости проведена с использованием критерия Фишера. Величины критериев получены также из результатов регрессионного анализа и, при заданном уровне значимости ($\alpha=0,05$) и числах степеней свободы $f_1=3$; $f_2=27$, составляют: $F_{расч.} = 17,60$, $F_{табл.} = 2,78$. Отсюда следует, что линейная функция (1) статистически значима и является искомой моделью прогнозирования кадастровой стоимости земель моногородов по факторам хозяйственной деятельности градообразующих предприятий.

Заключение

В ходе исследования разработана классификация земель моногородов Северо-Западного Федерального округа, при формировании которой наибольшую роль сыграли факторы: «степень социально-экономического развития» и «класс опасности градообразующего предприятия». Помимо обеспечения однородности выборки исследуемых объектов, необходимой для построения искомой прогнозной модели, предложенная классификация может найти практическое применение при кадастровой оценке земель моногородов на этапе группировки объектов [23].

Также установлено, что на кадастровую стоимость земель моногородов в наибольшей степени влияют такие факторы, как: «Численность населения в моногороде», «Мощность производства градообразующего предприятия», «Индекс загрязнения атмосферы в моногороде». Для них характерна наиболее сильная связь со стоимостью городских земель. Наименьшим образом на рынок недвижимости моногородов влияют факторы «Чистая прибыль предприятия за год», «Суммарный показатель загрязнения почвы в моногороде».

На основе собранных данных построены три прогнозные модели отражающие влияние деятель-

ности градообразующих предприятий на стоимость земель моногородов: линейная регрессия (1), регрессия второго порядка (2), логарифмическая модель (3). С учетом показателей качества выбрана зависимость, обладающая максимальными значениями коэффициентов качества, – линейная регрессия (1). Эта модель может применяться для целей прогнозирования стоимости земель моногородов по показателям градообразующей отрасли, а также для решения задач по оценке перспектив развития рынка недвижимости моногорода и управлению деятельностью градообразующего предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шаститко А.Е., Фатихова А.Ф. Моногорода: опыт количественного анализа // Балтийский регион. – 2016. – № 2. – Т. 8. – С. 7–29.
2. Koviazin V., Romanchikov F., Pasko O. Comparative analysis of forest lands cadastre appraisal estimated with regards to wood and food resources // JOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – Tomsk, 2015. – V. 27. – Article number 012039.
3. The issues of weed infestation with environmentally hazardous plants and methods of their control / V.L. Bogdanov, V.F. Koviazin, T.S. Posternak, O.A. Pasko // IOP Conference series. Earth and Environmental Science. – Tomsk, 11 October 2016. – V. 43. – Iss. 1. – Article number 012036.
4. Lepikhina O.J., Skachkova M.E. Identification of network structure indicators of cadastral cost of lands under commercial buildings of the small cities of Murmansk region // International Journal of Economic Research. – 2016. – V. 13. – Iss. 6. – P. 2425–2435.
5. Рубинштейн Е.Д., Осипенко Н.С. Анализ рынка недвижимости и его прогнозирование // Теория и практика общественного развития. – 2015. – № 12. – С. 140–143.
6. Комаров С.И. Прогнозирование в системе управления земельно-имущественным комплексом // Имущественные отношения в Российской Федерации. – 2010. – № 5. – С. 84–100.
7. Сихимбаев М.Р., Кумисбекова Ж.А. Математические методы оценки стоимости недвижимого имущества // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 6–1. – С. 119–123.
8. Устинов А.Ю. Теоретико-методические аспекты классификации моногородов. URL: <http://vestnik.uapa.ru/ru/issue/2012/04/15/> (дата обращения: 10.12.2016).
9. Распоряжение Правительства РФ от 29.07.2014 № 1398-р «Об утверждении перечня монопрофильных муниципальных образований Российской Федерации (моногородов)» URL: <http://docs.cntd.ru/document/420210942> (дата обращения: 10.12.2016).
10. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200–03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов» URL: <http://docs.cntd.ru/document/902065388> (дата обращения: 10.12.2016).
11. Clarke K.R., Somerfield P.J., Gorley R.N. Clustering in non-parametric multivariate analyses // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. – 2016. – V. 483. – P. 147–155.
12. Aldenderfer M.S., Blashfield R.K. Cluster analysis. – Thousand Oaks, CA: Sage Publications, 1984. – 37 p.
13. Казанская А.Ю., Компаниец В.С. Опыт исследования методов кластерного анализа из пакета statistica 6.0 на примере выборки городов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2009. – № 3. – Т. 92. – С. 103–110.
14. Суслов С.А. Кластерный анализ: сущность, преимущества и недостатки // Вестник НГИЭИ. – 2010. – № 1. – Т. 1. – С. 51–56.
15. Berkhin P. Survey of Clustering Data Mining Techniques, Scientific Report, – San Jose: Accrue Software, 2002. – 56 p.
16. Paul A. Gore. Jr. Cluster analysis. Handbook of Applied Multivariate Statistics and Mathematical Modeling. – San-Diego: Academic Press, 2000. – 24 p.
17. Ильина И.Н. Развитие моногородов России: монография. – М.: Финансовый университет, 2013. – 168 с.
18. Savu A., Raboj D. Cadastral Documentation in Real Valuation // The Valuation Journal. – 2014. – V. 9. – Iss. 1. – P. 54–71.
19. Bauman V. Cadastral Valuation Models // Economic Science for Rural Development: Proc. of International scientific conference. – Jelgava, 2010. – № 22. – P. 68–75.
20. Manuel-G Alcázar Molina. Proposal for Rustic Cadastral Valuation // FIG Working Week 2012. – Rome, Italy, 6–10 May 2012. – 24 p.
21. Bauman V. Evaluation of Indicators of Cadastral Assessment // Proc. 4th International Conference Civil Engineering'13. P. I. Land Management and Geodesy. – Jelgava, 2013. – P. 299–304.
22. Приказ Роснедвижимости от 29.06.2007 г. N П/0152 (ред. от 14.08.2008 г.) «Об утверждении Технических рекомендаций по государственной кадастровой оценке земель населенных пунктов» URL: <http://www.zakonprost.ru/content/base/124664> (дата обращения: 10.12.2016).
23. Ковязин В.Ф., Лепихина О.Ю., Зимин В.П. Группировка земель монопрофильных городов при их кадастровой оценке // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. – 2016. – № 4. – С. 84–95.

Поступила 30.01.2017 г.

Информация об авторах

Ковязин В.Ф., доктор биологических наук, профессор кафедры инженерной геодезии Строительного факультета Санкт-Петербургского горного университета.

Лепихина О.Ю., кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии Строительного факультета Санкт-Петербургского горного университета.

Зимин В.П., аспирант кафедры инженерной геодезии Строительного факультета Санкт-Петербургского горного университета.

UDC 528.44

PREDICTION OF CADASTRAL VALUE OF LAND IN A SINGLE-INDUSTRY TOWN BY THE REGRESSION MODEL

Vasily F. Kovyazin¹,

vfkedr@mail.ru

Olga Yu. Lepikhina¹,

Olgalepikhina1984@gmail.com

Viktor P. Zimin¹,

vic-zim@yandex.ru

¹ Saint-Petersburg Mining University,
2, 21st line of V.O., Saint Petersburg, 199026, Russia

Due to unstable economic situation in Russia, there is a high rate of change in indicators of city-forming enterprises economic activity. It has significant effect on ecological, social conditions of monotowns as well as on economic conditions related to real estate prices. Assessment and forecasting the influence of the city-forming enterprise economic activity on open market and cadastral value of lands of monotowns are important tasks for management of industry activities as well as for researching the perspective of development of the monotown real estate market.

The mail aim of the study is to develop the forecast model of land cadastral cost in monotowns considering the effect of the city-forming enterprises economic activity factors.

The methods used in the study. Applying the regression analysis the authors have developed the model of dependence of land cost in monotowns on the offered indicators of economic activity of the city-forming enterprises. The method of correlation analysis revealed the indicators exerting reliable impact on the cost of city lands; classification of monotowns is carried out by the cluster analysis method; the recession analysis method model was used to develop the dependence model of land cost in the researched objects on the factors of economic activity of the city-forming enterprises (linear, logarithmic and regression of the second order). For each model the authors determined the quality coefficients and chose the best dependence.

The results. By the results of quality check and statistical certainty of the offered models it is revealed that the linear regression model describes the researched dependence in the best way. It is established as well that the land cost in the researched monotowns is most influenced by such indicators of economic activity of the city-forming enterprises as population in the monotown, capacity of production of the city-forming enterprise, the index of atmosphere pollution in the monotown. The developed classification of the monotowns of the Northwestern Federal District, in addition to the purposes of the research, can be applied in case of cadastral assessment of lands of monotowns.

Key words:

Single-industry town, cadastral assessment, city-forming enterprise, cluster analysis, modeling, recession analysis.

REFERENCES

1. Shastitko A.E., Fatikhova A.F. Single-industry towns: the experience of quantitative analysis. *Baltiysky region*, 2016, no. 2, vol. 8, pp. 7–29. In Rus.
2. Kovyazin V., Romanchikov F., Pasko O. Comparative analysis of forest lands cadastre appraisal estimated with regards to wood and food resources. *JOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. Tomsk, 2015. Vol. 27, Article number 012039.
3. Bogdanov V.L., Kovyazin V.F., Posternak T.S., Pasko O.A. The issues of weed infestation with environmentally hazardous plants and methods of their control. *IOP Conference series. Earth and Environmental Science*. Tomsk, 11 October 2016. Vol. 43, Iss. 1, Article number 012036.
4. Lepikhina O.J., Skachkova M.E. Identification of network structure indicators of cadastral cost of lands under commercial buildings of the small cities of Murmansk region. *International Journal of Economic Research*, 2016, vol. 13, Iss. 6, pp. 2425–2435.
5. Rubinshteyn E.D., Osipenko N.S. Real estate market analysis and forecasting. *Teoriya i praktika obshchestvennogo razvitiya*, 2015, no. 12, pp. 140–143. In Rus.
6. Komarov S.I. Forecasting in management of land and property complex system. *Imushchestvennye otnosheniya v Rossiyskoy Federatsii*, 2010, no. 5, pp. 84–100. In Rus.
7. Sikhimbaev M.R., Kumisbekova Zh.A. Mathematical methods of valuating immovable property. *Mezhdunarodny zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovany*, 2015, no. 6–1, pp. 119–123. In Rus.
8. Ustinov A.Yu. Teoretiko-metodicheskie aspekty klassifikatsii monogorodov [Theoretical and methodological aspects of classification of single-industry towns]. Available at: <http://vestnik.ua-pa.ru/ru/issue/2012/04/15/> (accessed 10 December 2016).
9. *Rasporyazhenie Pravitelstva RF ot 29.07.2014 № 1398-r «Ob utverzhdenii perechnya monoprofilnykh munitsipalnykh obrazovaniy Rossiyskoy Federatsii (monogorodov)»* [On approval of the list of monoprofile municipal formations of the Russian Federation (monotowns). The disposal of the Government of the Russian Federation]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/420210942> (accessed 10 December 2016).
10. *Sanitarno-ehpidemiologicheskie pravila i normativy SanPiN 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Sanitarno-zashchitnye zony i sanitarnaya klassifikatsiya predpriyatiy, sooruzheniy i inykh obktov»* [Sanitary protection zones and sanitary classification of enterprises, constructions and other objects. Sanitary-epidemiological rules and norms]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902065388> (accessed 10 December 2016).
11. Clarke K.R., Somerfield P.J., Gorley R.N. Clustering in non-parametric multivariate analyses. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2016, vol. 483, pp. 147–155.
12. Aldenderfer M.S., Blashfield R.K. *Cluster analysis*. Thousand Oaks, CA, Sage Publications, 1984. 37 p.

13. Kazanskaya A.Yu., Kompaniets V.S. Experience in researching methods of cluster analysis from the package statistica 6.0 on the example of the sample of cities. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2009, no. 3, vol. 92, pp. 103–110. In Rus.
14. Suslov S.A. Cluster analysis: essence, advantages and disadvantages. *Vestnik NGIEHI*, 2010, no. 1, vol. 1, pp. 51–56. In Rus.
15. Berkhin P. *Survey of Clustering Data Mining Techniques*, Scientific Report, San Jose, Accrue Software, 2002. 56 p.
16. Paul A. Gore. Jr. *Cluster analysis. Handbook of Applied Multivariate Statistics and Mathematical Modeling*. San-Diego, Academic Press, 2000. 24 p.
17. Ilina I.N. *Razvitie monogorodov Rossii: monografiya* [Development of single-industry towns of Russia: monograph]. Moscow, Financial University Publ., 2013. 168 p.
18. Savu A., Raboj D. Cadastral Documentation in Real Valuation. *The Valuation Journal*, 2014, vol. 9, Iss. 1, pp. 54–71.
19. Bauman V. Cadastral Valuation Models. *Economic Science for Rural Development. Proceedings of International scientific conference*. Jelgava, 2010. No. 22, pp. 68–75.
20. Manuel-G Alcázar Molina. Proposal for Rustic Cadastral Valuation. *FIG Working Week 2012*. Rome, Italy, 6–10 May 2012. 24 p.
21. Bauman V. Evaluation of Indicators of Cadastral Assessment. *Proc. 4th International Conference Civil Engineering'13. P.I. Land Management and Geodesy*. Jelgava, 2013. pp. 299–304.
22. *Prikaz Rosnedvizhimosti ot 29.06.2007 g. N P/0152 (red. ot 14.08.2008 g.) «Ob utverzhenii Tekhnicheskikh rekomendatsiy po gosudarstvennoy kadastrvoy otsenke zemel naseleennykh punktov»* [On approval of technical recommendations about the state cadastral assessment of lands of settlements. The order of the Federal agency of the inventory of real estate objects]. Available at: <http://www.zakonprost.ru/content/base/124664> (accessed 10 December 2016).
23. Kovyazin V.F., Lepikhina O.Yu., Zimin V.P. Grouping the lands of single-industry towns for their cadastral estimation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeny. Povolzhsky region. Estestvennyye nauki*, 2016, no. 4, pp. 84–95. In Rus.

Received: 30 January 2017.

Information about the authors

Vasily F. Kovyazin, Dr. Sc., professor, Saint-Petersburg Mining University.

Olga Yu. Lepikhina, Cand. Sc., associate professor, Saint-Petersburg Mining University.

Viktor P. Zimin, postgraduate, Saint-Petersburg Mining University.

УДК 552.3:550.4:550.42:550.93

АБСОЛЮТНЫЙ ВОЗРАСТ, ПЕТРОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И РУДОНОСНОСТЬ ТОЧИЛЬНОГО ШТОКА ГОРНОГО АЛТАЯ

Гусев Анатолий Иванович¹,
anzerg@mail.ru

Гусев Николай Иванович²,
Nicolay_Gusev@mail.ru

Табакаева Евгения Михайловна¹,
tabakaeva16@mail.ru

¹ Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В.М. Шукшина, Россия, 659300, г. Бийск, ул. Владимира Короленко, 53.

² Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Средний проспект, 74.

Актуальность проведенных исследований определяется необходимостью уточнения абсолютного возраста и изучения петрологии, геохимии и оруденения гранитоидов Точильного штока Горного Алтая, который представлен сильно фракционированными разностями от меланосиенита до лейкогранита. С ними пространственно и парагенетически связаны различные типы оруденения: редкометалльные пегматиты и ювелирно-поделочное сырьё.

Цель исследования: определить абсолютный возраст и изучить петрологические, геохимические особенности пород и оруденения Точильного штока с использованием экспериментальных диаграмм, позволяющих выявлять генетические проблемы и физико-химические особенности петрогенезиса.

Методы исследований включали изучение состава горных пород с применением лазерно-абляционного анализа методом индуктивно-связанной плазмы на спектрометре «OPTIMA 4300» с высокой чувствительностью определения элементов в Лабораториях Всероссийского научно-исследовательского геологического института (г. Санкт-Петербург) и Объединённого института геологии и геофизики Сибирского отделения РАН (г. Новосибирск). Определение абсолютного возраста пород выполнено U-Pb методом SIMS (ионный микрозонд SHRIMP-II по циркону).

Результаты. Приведены данные по определению абсолютного возраста, геохимии и петрологии гранитоидов Точильного штока и его рудоносности. В пределах последнего выявлены меланосиениты, сиениты, гранит-порфиры, лейкограниты. Формирование штока отвечает пролонгированному периоду в 24 млн лет (от 238 до 262 млн лет). Такой длительный период формирования обусловил совмещение в одном штоке дериватов высоко-калиевой шошонитовой серии пород и высоко-K адакито-подобных разностей. По соотношениям Nb/Ta в породах предполагается плавление амфибол-содержащего источника, отвечающего высоко-Nb базальтам (NEB) утолщённой нижней коры. Эта субконтинентальная литосферная мантия, преобразованная базальтоидными магмами, образовавшимися при плавлении субдуцированной океанической литосферы, была трансформирована под воздействием плюмового источника. Редкометалльные пегматиты, связанные с гранитоидами Точильного штока, относятся к семейству Nb>Ta-Y-F (NYF). По геохимическим данным пегматиты относятся к редкоземельному классу (REE), обогащённому Zr, Ta, Nb. В сиенитах проявлен тетрадный эффект фракционирования P3Э M-типа.

Ключевые слова:

Геохимия, петрология, меланосиениты, сиениты, гранит-порфиры, лейкограниты, циркон, абсолютный возраст, редкометалльные пегматиты, тетрадный эффект фракционирования P3Э.

Геологическое строение точильного штока

Точильный шток располагается к северу от Белокурихинского плутона и включает в себя разрозненные выходы гранитоидов, обнажающихся в низовьях рек Песчаной и Даниловки, которым отвечает гравитационный минимум площадью 85 км². Указанный минимум имеет овальную форму, вытянутую в субмеридиональном направлении. Ранее этот шток считался лейкогранитовым по составу и рассматривался в составе Белокурихинского комплекса с возрастом поздняя пермь – ранний триас [1]. Более детальное изучение выходов штока показало, что в обнажающихся фрагментах кроме лейкогранитов имеются меланосиениты, сиениты и гранит-порфиры. Кроме того, установлено, что в пределах ареала значительным распространением пользуются редкометалльные пегматиты, а в дифференцированных разностях по-

следних отмечается ювелирно-поделочное сырьё: горный хрусталь, раухтопаз, аметист, зелёный турмалин.

В целом по взаимоотношениям породных типов в составе Точильного штока выделяются 3 фазы внедрения: 1 – меланосиениты, сиениты и кварцевые сиениты, 2 – гранит-порфиры, 3 – лейкограниты. В распределении породных типов разных фаз в нескольких фрагментах Точильного ареала устанавливается зональность, относящаяся к обратному типу, в котором более эволюционированные фазы (граниты, лейкограниты) локализируются по периферии массивов, а в центре – менее эволюционированные – породы первых фаз внедрения (меланосиениты, сиениты); контакты между фазами дисконкордантные или со слабо конкордантными текстурами и переходами. Характер зональности плутонов интерпретируется как результат химиче-

ской дифференциации в глубинном очаге и скорости поступления последовательных фаз. В случае быстрого поступления фаз и отдельных пульсаций предыдущие дифференциаты не успевают закристаллизоваться и более поздние фазы их легко прорывают и располагаются в центре плутонов с формированием нормальной зональности. И наоборот, когда скорость становления массивов малая, то предыдущие фазы внедрения успевают закристаллизоваться, и тогда более поздние дифференциаты внедряются на периферию плутонов с образованием обратной зональности [2], что и имеет место в отдельных фрагментах выходов гранитоидов Точильного ареала. Кроме того, замечено, что наиболее эволюционированные породные фазы во фрагментах Точильного штока образуют куполовидные выступы и располагаются на более высоких отметках по вертикали, чем ранние дифференциаты.

Петрографическая характеристика пород

Меланосиениты серой, розовато-серой окраски, крупнокристаллические. Они сложены калинатровым полевым шпатом (35–45 %), амфиболом феррогастингситового ряда ($f=49–62$ %) (20–22 %), редко биотитом (2–3 %), а в интерстициях указанных минералов содержат плагиоклаз и кварц (2–4 %). Плагиоклаз представлен анортитом (№ 42–48). По периферии окружён каёмкой олигоклаза. Акцессорные минералы представлены (г/т) магнетитом (4950), апатитом (65) и цирконом (25). Они характеризуются высокой щелочностью ($K_2O=7,2$ %, $Na_2O=3,62$ %), титанистостью (1,4 % TiO_2) и фосфористостью (0,33 % P_2O_5), высоким содержанием (г/т) бария (1850), стронция (3450), циркония (330), ниобия (8,5), скандия (9), урана (5,5), кобальта (7,5), никеля (12,3) и тория (9,1).

Сиениты, реже кварцевые сиениты, представляют собой красновато-серые крупно-среднезернистые массивные породы. Это порфировидные магматиты (во вкрапленниках плагиоклаз 1 генерации и пироксен). Структура основной ткани породы гипидиоморфнозернистая с заметным идиоморфизмом плагиоклаза, пироксена и роговой обманки. Они состоят из крупнопертитового калинатрового полевого шпата (42–50 %), клинопироксена (диопсида – 15 %), амфибола (от 5 до 11 %) паргасит-феррогастингситового ряда ($f=45–55$ %), биотита (от 1 до 3 %) истонит-сидерофиллитового ряда, мусковита (от 1 до 5 %). В группе акцессориев присутствуют: сфен (до 1 %) и магнетит (1120 г/т), редко салит ($f=32–36$ %). Плагиоклаз 1 генерации зонален с анортитом (№ 40–42) в ядре и олигоклазом (№ 19–21) по периферии. Нередко соссюритизирован. Плагиоклаз основной ткани породы сложен олигоклазом (№ 25–27), он менее изменён, чем плагиоклаз вкрапленников. Диопсид местами тремолитизирован, а роговая обманка и биотит – хлоритизированы.

Гранит-порфиры биотитовые – среднезернистые, светло-серой окраски, местами с розоватым оттенком. Структура порфировая, а основной тка-

ни – гипидиоморфнозернистая, редко – микропегматитовая. Состав (%): кварц (30–35), микроклин (28–42), плагиоклаз (20–22), биотит (5–7), мусковит (1–2). Акцессорные минералы – магнетит, апатит, циркон, редко – сфен. Плагиоклаз зонален. В ядре таких выделений кристаллизовался олигоклаз (№ 26–28) до андезина (№ 32), а по периферии – альбит. Биотит в виде чешуек и копьевидных выделений относится к маложелезистой разновидности ($f=40–42$), по периферии нередко окружён мусковитом. Плагиоклаз в виде призматических выделений нередко отмечается внутри порфировых индивидов микроклина. Изредка в гранит-порфирах отмечаются миаролы с горным хрусталём и турмалином.

Лейкограниты двуслюдяные, нередко – миароловые. Это светло-серые изредка с розоватым оттенком породы, являющиеся главной фазой. Структура их гипидиоморфнозернистая, местами – аплитовидная. Состав (%): кварц – 34–40, микроклин (27–41), плагиоклаз – 10–14, биотит и мусковит – 1–4. Плагиоклаз обладает идиоморфными выделениями. А кварц и микроклин – ксеноморфны. Микроклин чаще бесструктурный и редко имеет решетчатую микроструктуру. Плагиоклаз зонален. В ядре определяется как андезин (№ 32–34), а в периферических каёмках – как альбит-олигоклаз. Ядерная зона плагиоклаза часто замещается агрегатом пелита, хлорита, серицита, кварца. Чешуйчатый биотит содержит включения акцессориев: магнетита, апатита, циркона, сфена. Мусковит кристаллизовался позднее биотита. Он образует самостоятельные выделения и корродирует биотит. В миаролах присутствуют турмалин, горный хрусталь, амethyst.

Определение абсолютного возраста гранитов штока

Первое определение абсолютного возраста для пегматитов Точильного штока Ar-Ar-методом по мусковиту выполнено группой авторов [3]. По данным $^{40}Ar-^{39}Ar$ абсолютный возраст составил 247 ± 3 млн лет.

Авторами выполнено определение абсолютного возраста U-Pb-методом по циркону для гранит-порфиров на основании 10 зёрен циркона. Преобладающая форма кристаллов циркона призматическая. Все зёрна характеризуются зональным строением, подчёркиваемым чередованием светлых и тёмных полос. Католюминесцентные изображения цирконов и «кратеров» замеров приведены на рис. 1–4.

Соотношения изотопов Pb, U, Th и полученные абсолютные возраста приведены в табл. 1. Возрастной интервал значений весьма широкий – от 238 до 262 млн лет.

Петрогеохимические особенности породных типов штока

Представительные анализы породных типов Точильного штока приведены в табл. 2. U/Th отношения в породах Точильного штока менее 1, что

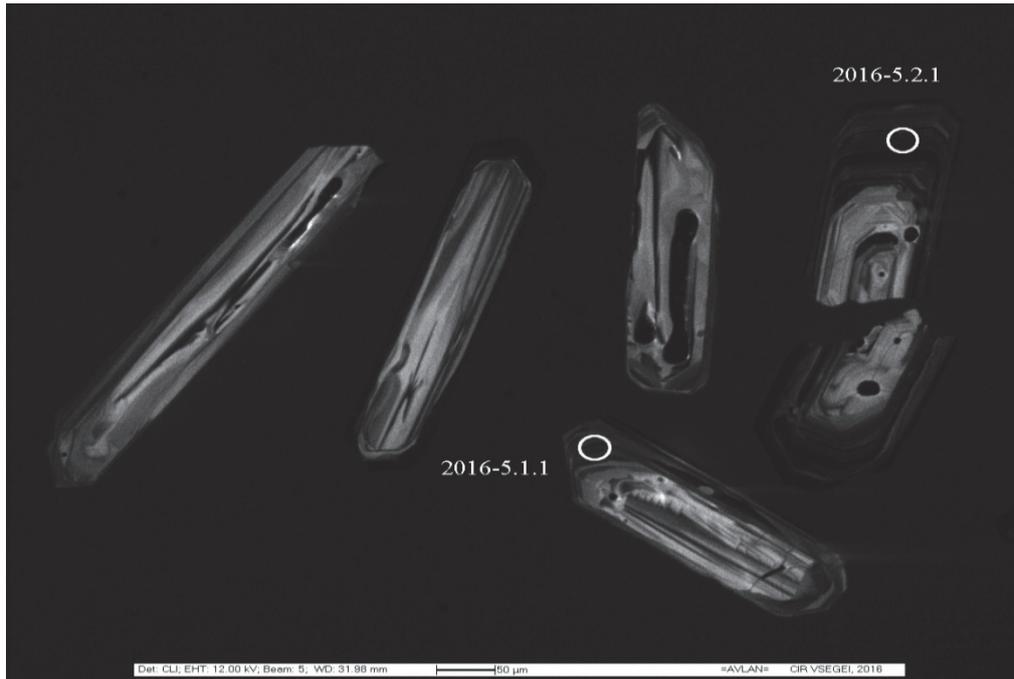


Рис. 1. Катодолюминесцентные изображения цирконов из образца гранит-порфиров (проба 2016–5, замеры 1.1 и 2.1)

Fig. 1. Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons from the granite-porphyre sample (probe 2016–5, measures 1.1 and 2.1)

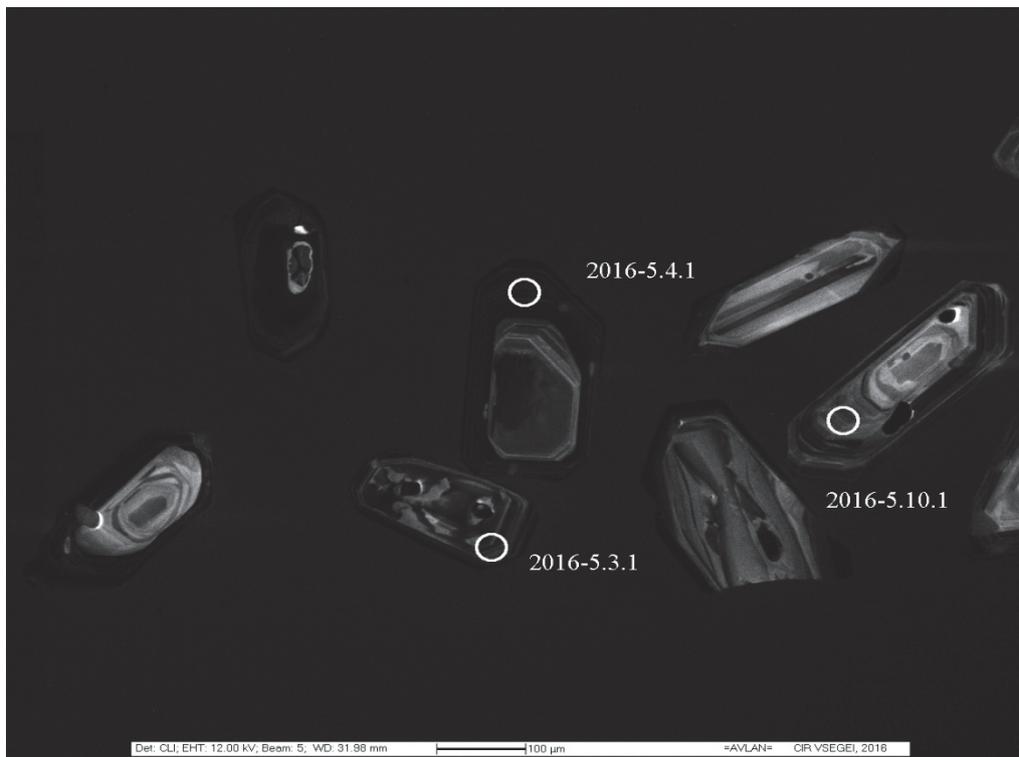


Рис. 2. Катодолюминесцентные изображения цирконов из образца гранит-порфиров (проба 2016–5, замеры 3.1, 4.1 и 10.1)

Fig. 2. Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons from the granite-porphyre sample (probe 2016–5, measures 3.1, 4.1 and 10.1)



Рис. 3. Катодолюминесцентные изображения цирконов из образца гранит-порфиров (проба 2016–5, замеры 5.1, 6.1 и 7.1)

Fig. 3. Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons from the granite-porphyre sample (probe 2016–5, measures 5.1, 6.1 and 7.1)

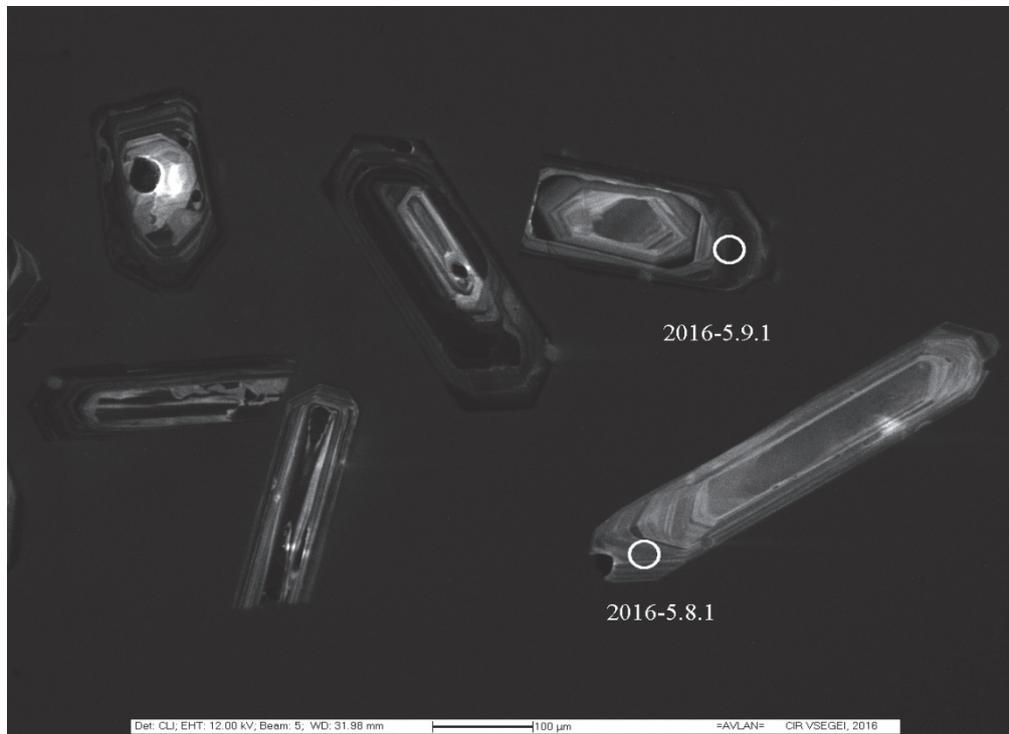


Рис. 4. Катодолюминесцентные изображения цирконов из образца гранит-порфиров (проба 2016–5, замеры 8.1 и 9.1)

Fig. 4. Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons from the granite-porphyre sample (probe 2016–5, measures 8.1 and 9.1)

Таблица 1. Изотопный состав Pb, U, Th в цирконах гранит-порфиров Точильного штока и абсолютные возраста

Table 1. Isotope composition of Pb, U, Th in zircons of granite-porphyrates of Tochilny stock and absolute ages

Точки замеров Points of tests	$^{206}\text{Pb}_c$	U, г/т (g/t)	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	$^{206}\text{Pb}^*$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{238}\text{U}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$
					Возраст, млн лет / Age, million years		Возраст / Age	
6.1	0,8	423	0,45	13,8	238,1±3	383±140	26,58±1,3	0,0543±6
7.1	2,82	1132	0,52	38,5	243,3±2,8	235±230	26±1,2	0,0509±10
3.1	0,55	1090	0,34	37	248,6±2,6	299±88	25,43±1,1	0,0523±3,9
1.1	0,20	517	0,39	17,5	249,3±2,9	218±72	25,36±1,2	0,0505±3,1
4.1	1,14	1767	0,35	61,7	254,0±2,6	272±100	24,89±1,1	0,0517±4,5
8.1	0,00	277	0,44	9,69	256,9±3,3	195±77	24,6±1,3	0,0500±3,3
10.1	0,13	744	0,29	26,1	257,3±2,8	244±55	24,56±1,1	0,0511±2,4
2.1	0,11	1226	0,40	43,2	259,0±2,7	250±44	24,4±1,0	0,0512±1,9
9.1	0,22	1340	0,26	47,3	259,1±2,7	283±49	24,38±1,1	0,0519±2,1
5.1	0,50	1544	0,34	55,3	262,1±2,7	219±68	24,09±1,0	0,0505±2,9

Примечание. Ошибки составляют 1-сигма. Pb_c и Pb^* указывают на обычную и радиогенную части свинца, соответственно. Общий Pb скорректирован с использованием измеренного изотопа ^{204}Pb .

Note. Errors are 1-sigma; Pb_c and Pb^* indicate the common and radiogenic portions, respectively. Sum Pb is corrected using the measured ^{204}Pb .

Таблица 2. Химические составы пород Точильного штока

Table 2. Chemical composition of rocks of Tochilny stock

Компоненты/Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	57,2	62,3	62,5	72,5	72,9	74,1	74,4	73,8	77,0	77,18
TiO ₂	1,4	0,16	0,7	0,41	0,15	0,14	0,15	0,15	0,017	0,09
Al ₂ O ₃	17,1	21,1	17,8	14,4	15,5	14,6	14,5	14,6	13,7	12,56
Fe ₂ O ₃	7,1	1,4	3,1	1,84	1,22	1,14	1,2	1,28	0,23	0,99
MnO	0,16	0,035	0,09	0,055	0,035	0,03	0,05	0,078	0,018	0,03
MgO	1,4	0,37	0,81	0,5	0,36	0,21	0,22	0,25	<0,1	0,13
CaO	3,6	1,14	1,95	1,62	1,18	1,05	1,0	1,12	0,31	0,45
Na ₂ O	3,62	5,42	4,35	2,88	3,04	3,02	3,5	2,93	4,46	2,08
K ₂ O	7,2	6,97	7,31	5,07	4,91	5,19	5,2	5,06	4,0	5,84
P ₂ O ₅	0,33	0,1	0,12	0,1	0,074	0,076	0,08	0,093	<0,5	0,54
П.п.п.	1,0	1,05	0,9	0,49	0,71	0,62	0,5	0,69	0,36	0,03
Сумма/Sum	99,8	100	99,9	100	100	100	100	100	100	99,92
Li	19,1	126	65,7	187	108	106	110	107	25,2	60,5
Cs	12,5	37,9	38,1	18	17,5	20,6	16,8	20,6	9,21	6,30
Rb	120	422	187	257	206	211	215	197	229	240
Sr	3450	125	155	182	102	98,5	101	106	13,6	15
Ba	1850	355	404	420	292	290	280	290	6,75	5,50
La	22,3	39,9	45,8	47,2	28	31,9	28,4	33,9	9,99	4,30
Ce	55,4	81,3	59,7	99,4	59,5	65,9	58,6	68,9	25,3	8,48
Pr	5,3	9,39	10,1	10,9	6,8	7,57	6,75	7,87	3,38	0,99
Nd	24,6	34,3	25,2	40,2	24,6	26,9	23,8	28,9	12,8	3,61
Sm	6,1	6,88	6,6	7,45	4,71	5,33	5,05	6,33	4,49	0,75
Eu	1,5	0,59	1,2	1,01	0,45	0,53	0,58	0,55	0,058	0,07
Gd	6,4	5,5	6,7	5,59	4,07	4,75	3,88	4,78	4,16	0,73
Tb	1,1	0,7	1,2	0,79	0,54	0,56	0,53	0,58	0,75	0,13
Dy	5,0	3,11	5,0	4,17	2,32	2,7	2,77	2,75	4,78	0,75
Ho	0,48	0,53	0,6	0,81	0,39	0,54	0,47	0,54	1,1	0,17
Er	1,5	1,35	1,4	2,37	1,08	1,41	1,17	1,43	3,24	0,63
Tm	0,6	0,19	0,4	0,35	0,14	0,18	0,17	0,19	0,58	0,13
Yb	3,3	1,44	3,1	2,3	0,94	1,06	1,13	1,16	3,86	1,01
Lu	0,6	0,18	0,5	0,37	0,14	0,18	0,14	0,18	0,66	0,17
Y	20,1	16,1	19,2	22,9	12,9	15,2	15,5	16,2	30	4,7
Zr	330	114	245	216	97,2	105	94,8	109	49,4	44,0
Nb	6,5	15,9	19,2	17,7	11,9	13	12,5	14	42	15,0
Hf	5,1	3,39	11,1	6,01	2,91	3,52	2,77	3,6	4,06	2,60
Ta	0,7	2,81	1,4	1,95	1,78	2,28	2,26	2,31	9,3	2,20

Окончание табл. 2

Table 2.

Компоненты/Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Th	9,1	23,1	18,6	25,5	17,2	17,8	17,1	17,9	14,3	–
U	5,5	8,63	4,62	3,77	9,5	4,6	4,77	4,5	8,61	–
Sc	9,0	5,11	–	5,74	4	4,04	–	3,95	2,77	–
Co	2,5	1,28	–	3,42	1,16	1,38	–	2,15	<0,5	–
Ni	2,3	1,83	2,0	3,06	2,17	2,13	2,2	2,58	2,09	2,1
Cu	74,3	66,6	–	2,48	6,81	3,53	–	2,78	7,49	–
Zn	58,9	56,2	–	61,8	45,9	41	–	45	5,35	–
Ag	0,2	0,2	–	0,043	0,086	0,075	–	0,076	0,15	–
Sb	–	<0,1	–	<0,1	<0,1	<0,1	–	<0,1	<0,1	–
Pb	56,8	33,9	–	31,4	33,7	34,1	–	34,4	34,1	–
Be	2,9	12,7	–	4,05	2,71	2,5	–	4,6	3,39	–
V	9,8	8,45	–	26,5	6,24	634	–	7,17	<2,5	–
Cr	6,6	5,6	6,0	22,2	17,9	17,3	15,7	13,2	43,9	–
Ga	24,8	26,1	–	19,0	15,9	16	–	17,8	17,4	–
Mo	–	<0,6	–	2,03	1,89	1,9	–	1,9	5,36	–
Sn	–	15,3	12,8	5,86	5,78	5,33	5,5	5,33	2,36	–
Ru	–	<0,002	–	<0,002	<0,002	<0,002	–	<0,002	<0,002	–
Rh	–	<0,002	–	<0,002	<0,002	<0,002	–	<0,002	<0,002	–
Pd	–	0,0067	–	0,0059	0,0034	0,0056	–	<0,002	<0,002	–
Ir	–	<0,002	–	<0,002	<0,002	<0,002	–	<0,002	<0,002	–
Pt	–	<0,002	–	0,0051	<0,002	<0,002	–	<0,002	<0,002	–
Au	–	0,0032	–	<0,002	<0,002	<0,002	–	0,002	0,0087	–
U/Th	0,6	0,37	0,25	0,15	0,55	0,26	0,28	0,25	0,6	–
Th/U	1,65	2,68	4,03	6,76	1,81	3,87	3,58	3,98	1,66	–
(La/Yb) _N	4,5	18,3	9,8	13,6	19,7	19,9	16,6	19,3	1,7	4,40
Eu/Eu*	0,73	0,29	0,55	0,46	0,31	0,32	0,39	0,3	0,04	0,53
ΣP3Э/ΣREE	154,3	201,46	186,7	245,81	146,58	164,71	148,94	174,26	108,15	26,23
Sr/Y	171,6	7,8	8,1	7,9	7,9	6,5	6,5	6,5	0,45	3,2
La/Yb	6,8	27,7	14,8	20,5	29,8	30,1	25,1	29,2	2,6	4,3
TE _{1,3}	1,09	1,0	1,18	1,0	1,03	0,96	1,03	0,95	1,06	1,0
Nb/Ta	9,3	5,7	13,7	9,1	6,7	5,7	5,5	6,1	4,5	6,8

Примечание. 1 – меланосиенит роговообманковый; 2, 3 – сиениты; 4, 5 – двуслюдяные гранит-порфиры; 6, 7 – двуслюдяные лейкограниты с турмалином; 8 – двуслюдяной лейкогранит с миаролами; 9 – лейкогранит мусковитовый (дайка); 10 – лейкогранит. «–» – анализ не проводился. Нормализация осуществлена по хондриту [4].

Note. 1 – melanosyenite hornblende; 2, 3 – syenites; 4, 5 – two micas granite-porphyre; 6, 7 – two-mica leucogranite with tourmaline; 8 – two-mica leucogranite with miarolitic; 9 – muscovitic leucogranite; 10 – leucogranite. «–» – were not analyzed. Normalized by hondrite [4].

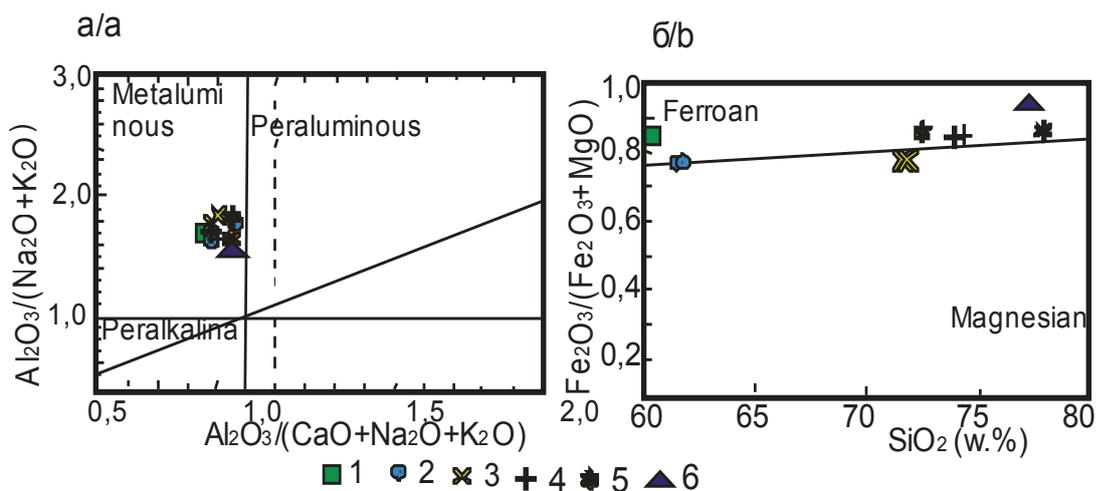


Рис. 5. Диаграммы $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O) - Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ (а) по [5] и $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+MgO) - SiO_2$ (б) по [6] для пород Точильного штока. 1 – меланосиенит, 2 – сиениты, 3 – двуслюдяные гранит-порфиры, 4 – двуслюдяные лейкограниты с турмалином, 5 – лейкограниты с миаролами, 6 – лейкогранит мусковитовый (дайка)

Fig. 5. Classification plots a) $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O) - Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ after [5]; b) $SiO_2 - Fe_2O_3/(Fe_2O_3+MgO)$ after [6] for rocks of Tochilny stock. 1 – melanosyenite, 2 – syenites, 3 – two-mica granite-porphyre, 4 – two-mica leucogranites with tourmaline, 5 – leucogranites with miarolitic, 6 – leucogranite (dike)

указывает на относительно неизменённый их состав и отсутствие наложенных процессов. Сумма РЗЭ в ранних фазах несколько выше, чем в поздних дериватах. Содержания платиноидов и золота в породах или ниже чувствительности анализа, или слабо превышают его. Значимая величина тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ М-типа выявлена только в одной пробе сиенита (1,16).

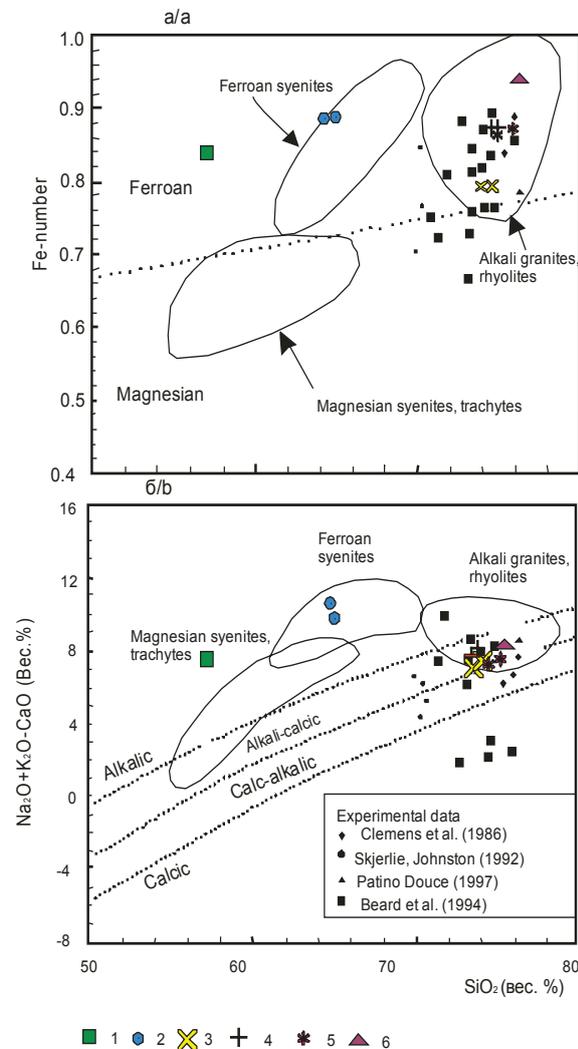


Рис. 6. Дискриминационные диаграммы: а) коэффициент железистости $[\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})] - \text{SiO}_2$; б) $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}) - \text{SiO}_2$ по [7], показывающие классификацию щелочных гранитов и риолитов, железистых сиенитов и магниальных сиенитов и трахитов. Экспериментальные данные по [8–11]. Остальные условные обозначения – на рис. 5

Fig. 6. a) Fe-number $[\text{FeO}/(\text{total FeO} + \text{MgO})] - \text{SiO}_2$; б) $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}) - \text{SiO}_2$ discrimination diagrams after [7], showing the classification of the alkali granite and rhyolite, ferroan syenite and magnesian syenite, and trachyte. The experimental data are from [8–11]. Legend is in Fig. 5

По соотношениям некоторых главных компонентов породные типы Точильного штока относятся к металюминиевому типу (рис. 5, а). Железисто-магниальные показатели свидетельствуют о

принадлежности пород и железистому, и магниальному типам (рис. 5, б).

На дискриминационных диаграммах составы пород Точильного ареала тяготеют к разным полям (рис. 6).

Породы ранних фаз или попадают в поле железистых сиенитов, или близки к нему (рис. 6, а, б). Более поздние дериваты попадают в поле щелочных гранитов и риолитов (рис. 6, а, б).

Рудоносность гранитоидов Точильного ареала

Характерной особенностью выходов гранитоидов Точильного ареала является рудоносность самих породных типов и наличие пегматитовых тел. Миароловые граниты развиты во всех коренных выходах пород и повсеместно содержат редкие единичные кристаллики или щёточки и сростания раухтопаза, турмалина, амethystа.

Проявление пегматитов Точильное находится в пределах одноименного штока лейкогранитов Точильного ареала. В Точильном штоке выделяются миароловые граниты, в которых миаролы выполнены кварцем, турмалином (шерл), редко – зелёной прозрачной разновидностью турмалина – верделитом, раухтопазом, алмандином. Местами отмечаются сплошные миаролиты. В западной части штока проявлены многочисленные прожилки, выполненные щёточками горного хрусталя, амethystа, халцедона. Наиболее крупные выделения раухтопаза приурочены к жилам крупноблоковых пегматитов, которых насчитывается 9, горного хрусталя, раухтопаза, реже – амethystа. Длина отдельных кристаллов достигает 7–10 см. Дымчатый кварц полупрозрачен.

В наиболее мощных пегматитах, состоящих из кварца, микроклина, мусковита, турмалина, реже – топаза, проявлена минерализация вольфрамита, шеелита, ортита, монацита, циркона, колумбита размерами от 0,5 до 1,5 см в поперечнике, тяготеющая к дымчатому кварцу. Содержания элементов по штурфным пробам варьируют (%): иттрия от 0,1 до 0,7; церия от 0,2 до 1,7; циркония от 0,2 до 1,6; ниобия от 0,05 до 0,7; тантала от 0,01 до 0,2; триоксида вольфрама от 0,1 до 0,3.

В случае пегматитов Точильного ареала можно с уверенностью констатировать глубинный гранитоидный очаг и предположить кристаллизационную дифференциацию гранитоидного расплава, близкого к шшонитовому с образованием заключительных порций лейкогранитового состава, парагенетически с которым формировались пегматиты, насыщенные и водой и другими летучими компонентами.

Приведенные данные показывают, что гранитоиды Точильного штока характеризуются ярко выраженной радиогеохимической специализацией (табл. 1). Это подтверждается повышенными содержаниями в породах тория и отношениями Th/U (от 1,65 до 6,76). Такие показатели указывают на возможное обнаружение и уранового оруденения в пространственной и парагенетической свя-

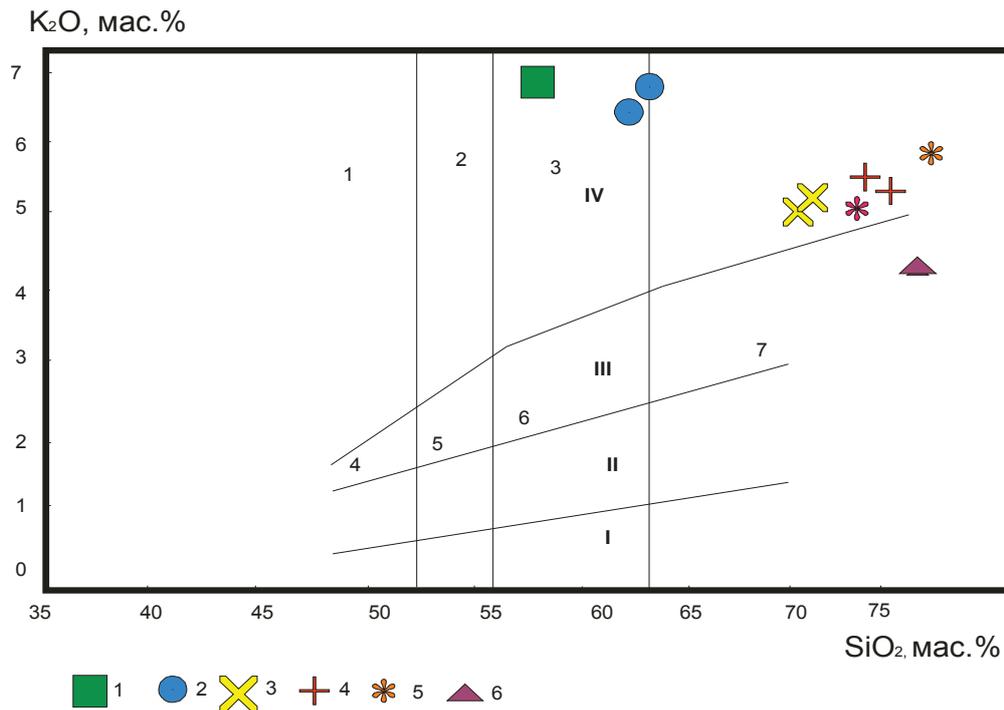


Рис. 7. Диаграмма K_2O-SiO_2 для породных типов Точильного ареала. Поля пород: 1 – абсарокит; 2 – шошонит; 3 – банакит; 4 – высоко-К базальт; 5 – высоко-К андезибазальт; 6 – высоко-К андезит; 7 – высоко-К дацит по [13]. Серии пород: I – толеитовая; II – известково-щелочная; III – высоко-К известково-щелочная; IV – шошонитовая. Остальные условные обозначения – на рис. 5

Fig. 7. K_2O-SiO_2 plot for rock types of Tochilny areal. Field of rocks: 1 – absarokite, 2 – shoshonite, 3 – banakite, 4 – high-K basalt, 5 – high-K basaltic andesite, 6 – high-K andesite, 7 – high-K dacite after [13]. Series of rocks: I – tholeiitic rock series, II – calc-alkalic, III – high-K calc-alkalic, IV – shoshonitic. Legend is in Fig. 5

зи с гранитоидами Точильного штока. Сопоставление проявления с аналогичными по составу щелочными и шошонитовыми гранитоидами других регионов, согласно сводке по [12], не противоречит такому заключению. И действительно в составе Белокурихинского плутона выявлена протяжённая Искровско-Белокурихинская уран-редкометалльно-редкоземельная зона.

Интерпретация результатов

Геологические и петрографические данные (наличие миароловых разностей, пегматитов) свидетельствуют о формировании пород штока на относительно небольших глубинах. Приведенные данные показывают, что гранитоиды Точильного штока формировались длительное время – не менее 24 млн лет. Скорость становления штока, которая и привела к формированию обратной зональности в строении массива, была небольшой. Такие условия генерации небольшого по размерам массива предполагают сложный сценарий его формирования.

По соотношению K_2O и SiO_2 все породы, кроме лейкогранитов дайки, следует отнести к шошонитовой серии (рис. 7). Лейкограниты дайки попадают в поле высоко-К известково-щелочной серии пород.

По соотношениям $Sr/Y-Y$ и $La/Yb-Yb$ породные типы Точильного ареала показывают явные

неоднозначные признаки смешанных пород: адакитовых и нормальных андезитов-дацитов-риолитов (рис. 8, а, б). А по соотношениям $La/Yb-Yb$ некоторые фигуративные точки составов пород тяготеют к тренду модели смешения различных магм (рис. 8, б).

По соотношению $Mg\#-SiO_2$ фигуративные точки составов пород показывают неоднозначность отнесения или к утолщённой нижней коре корово-производных адакито-подобных пород, или к метабазальтовым и эклогитовым экспериментальным расплавам (рис. 9, а). По соотношениям $Ni-SiO_2$ породы Точильного ареала однозначно попадают в поле утолщённой нижней коры корово-производных адакито-подобных пород (рис. 9, б).

Большое значение в понимании генезиса пород имеет источник плавления, за счёт которого образуются породы. Так, считается, что плавление источника пород, содержащих фазы Ti -обогащённых ингредиентов (рутила, ильменита), будет генерировать расплавы с высоким отношением Nb/Ta (>25), в то время как плавление источника с амфиболом приводит к формированию расплавов с более низким отношением Nb/Ta (<25) [19, 20]. В породных типах Точильного ареала отношения Nb/Ta варьируют от 4,5 до 13,7, что позволяет предполагать плавление амфибол-содержащего источника.

Ключевое значение для понимания генезиса

высоко-К адакито-подобных гранитоидов Точильного ареала имеют anomalно высокие концентрации в них Nb (от 12,5 до 42 г/т). Это свидетельствует об образовании их за счёт плавления высоко-Nb базальтов (NEB). Возможно, такими высоко-Nb базальтами могли быть metabазиты засурьинской или средне-кумирской свит, содержащих высокие концентрации Nb.

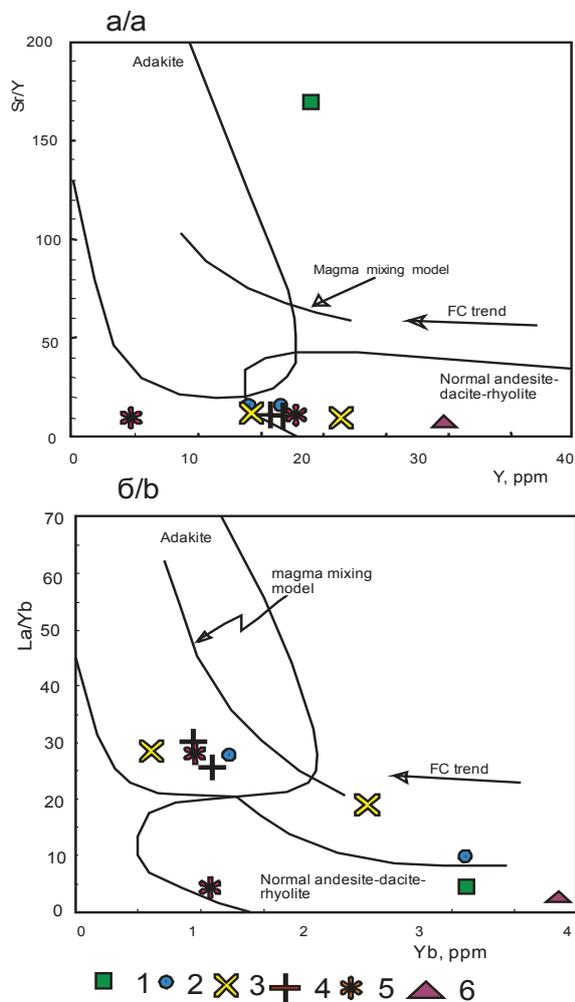


Рис. 8. Диаграммы: а) Sr/Y–Y; б) La/Yb–Yb по [14] для пород Точильного ареала. Поля пород: Адакитов (Adakite), нормальных андезитов-дацитов-риолитов (Normal andesite-dacite-rhyolite). Тренд фракционной кристаллизации (FC trend); модель магматического смешения по [15]. Остальные условные обозначения – на рис. 5

Fig. 8. Plots of: a) Sr/Y–Y; b) La/Yb–Yb after [14] for rocks of Tochilny areal. Fractional crystallization (FC) trend. Magma mixing modeling follows [15]. Legend is in Fig. 5

На основании приведенных данных можно сделать вывод о том, что в Точильном ареале имеет место совмещение двух типов источников расплавов: шошонитового и адакито-подобного. Следует отметить, что восточнее Точильного ареала располагается Айский ареал гранитоидов, где также зафиксировано совмещение двух типов магматических источников: шошонитового и адакитового [21].

В Яломанском гранитоидном ареале также отмечено совмещение и смешение различных типов расплавов [22]. Совмещение шошонитового и адакито-подобного расплавов отмечено и в других регионах [23, 24].

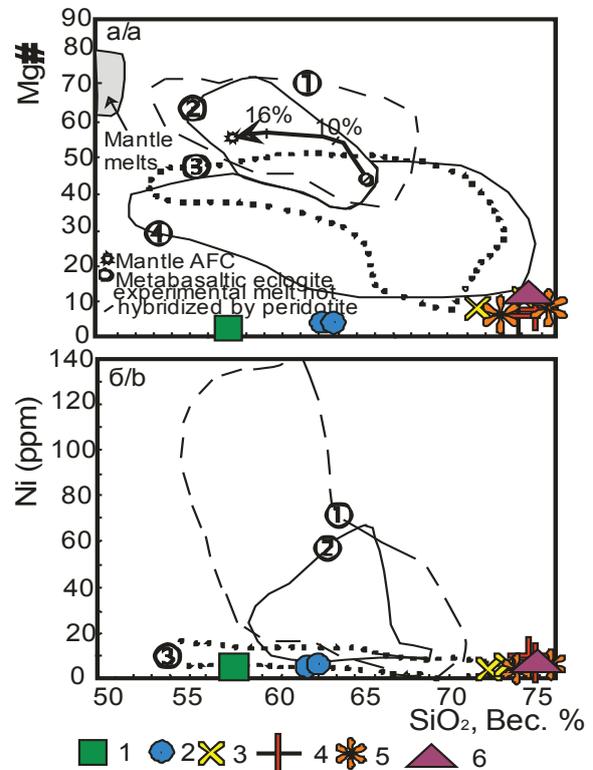


Рис. 9. Диаграммы Mg#–SiO₂ (а) и Ni–SiO₂ (б) по [16] для пород Точильного ареала. Мантийный тренд AFC на рис. 9, а по [17] с процентной ассимиляцией перидотитов. Начальная точка составов metabазальтов или эклогитовых экспериментальных расплавов, не гибридизированных перидотитами, – по [17]. Поля: субдуцированных океанических корово-производных адакитов (1), утолщённой нижней корово-производных адакито-подобных пород (3), деламинированных ниже-корово-производных адакито-подобных пород (2), metabазальтовых и эклогитовых экспериментальных расплавов (1–4 GPa) (4), metabазальтовых и эклогитовых экспериментальных расплавов, гибридизированных перидотитами, – по [18]

Fig. 9. Plots of Mg#–SiO₂ (a) and Ni–SiO₂ (b) after [16] for rocks of Tochilny areal. Mg-number (Mg#)–SiO₂ (wt. %) (a); Ni (ppm) – SiO₂ (wt. %) (b). Mantle AFC curve in (a) is after [17] with the percentage of assimilated peridotite show. The starting point represents the composition of metabasaltic or eclogite experimental melt not hybridized with peridotite [17]. Fields of subducted oceanic crust-derived adakites, thick lower crust-derived adakite-like rocks (3), delaminated lower crust-derived adakite-like rocks (2), metabasaltic and eclogite experimental melts (1–4 GPa) (4), metabasaltic and eclogite experimental melts hybridized by peridotite. Fields of subducted oceanic crust-derived adakites, thick lower crust-derived adakite-like rocks, delaminated lower crust-derived adakite-like rocks and metabasaltic and eclogite experimental melts hybridized with peridotite are after [18]. Legend is in Fig. 5

Геохимические характеристики анализируемых высоко-К адакито-подобных пород Точильного штока позволяют относить их к HSA типу магм (High Si adakites), источником которых является субконтинентальная литосферная мантия, преобразованная базальтоидными магмами, образовавшимися при плавлении субдущированной океанической литосферы под воздействием плюмового источника.

Единой классификации пегматитов в настоящее время не существует. По наиболее распространенной классификации, учитывающей рудные компоненты, пегматиты Точильного проявления ближе к семейству Nb>Ta-Y-F (NYF) по [25]. NYF пегматиты относятся к пералкалиновым по составу, отражая субалюминиевый, средне фракционированный анорогенный А-тип, или изверженный I-тип – родоначальный (пегматитогенерирующий) тип гранитов [26]. Пегматиты этого семейства часто обогащены HREE, Be, Ti, Sc и Zr [25]. Сходный состав характерен и для пегматитов Точильного проявления, однако для пегматитов последнего наблюдается связь с шопонитовым интрузивным магматизмом, в котором на заключительных этапах формируются значительные объемы адакито-подобных пород и лейкогранитов.

Более детальное подразделение пегматитов основано на глубинах их формирования. Выделяют 5 классов: абиссальные, мусковитовые, мусковит-редкометалльные, редкоэлементные и миаролитовые [25]. В нашем случае пегматиты Точильного проявления следует относить к редкоэлементному классу.

Обычно редкоэлементный класс пегматитов соотносится с зеленосланцевой и амфиболитовой фациями метаморфизма, формирующихся на малых и умеренных глубинах. Они, как правило, сильно переменны по составу и характеризуются различной степенью фракционирования редкоземельных элементов [25]. По геохимическим данным выделяются два подкласса: редкоземельный (REE), обогащенный Zr, Nb, Sc, и литиевый, обогащенный Rb, Cs [26]. Редкоземельный подкласс расплавов обычно генерируется из пост-орогенных и доанорогенных пералкалиновых и пералюминиевых расплавов, образующихся в условиях растяжения, в то время как литиевый подкласс рас-

плавов формируется из синколлизонных допосторогенных пералюминиевых расплавов, генерированных в обстановке сжатия [26]. Редкоземельный подкласс подразделяется на 3 типа, различающихся минералогическими и геохимическими особенностями. В составе редкоземельного подкласса рассматриваются следующие типы: 1 – алланит (ортит)-монацитовый, обогащенный легкими PЗЭ; 2 – эвксенитовый тип, обогащенный Y с переменными отношениями легких PЗЭ к тяжелым LREE/HREE; 3 – гадолинитовый тип, обогащенный тяжелыми PЗЭ с Y и Be [26]. Согласно приведенной классификации пегматиты Точильного проявления следует относить к ортит-монацитовому типу. Специфика пегматитов Точильного проявления – это высокие концентрации Zr, Ta, Nb, помимо типоморфных легких PЗЭ.

По другой классификации, основанной на соотношении главных породообразующих минералов, пегматиты Точильного штока следует относить к III группе, характеризующейся относительным обогащением летучими и кремнекислотой, но обедненными фосфором с кварцем, субальбусным калиевым полевым шпатом и мусковитом [27].

Заключение

Геолого-петрографические характеристики штока свидетельствуют о близкповерхностном становлении Точильного штока с образованием обратной зональности в его строении. Глубинный очаг был долгоживущим, и пролонгированный период последовательных пульсаций создал прецедент совмещения в небольшом по размеру массиве двух серий пород: высоко-К шопонитовой и высоко-К адакито-подобной.

Источником высоко-К адакито-подобной серии пород Точильного штока являлась субконтинентальная литосферная мантия, преобразованная базальтоидными магмами, образовавшимися при плавлении субдущированной океанической литосферы под воздействием плюмового источника Сибирского суперплюма.

С гранитоидами штока связаны пегматиты, относящиеся к семейству Nb>Ta-Y-F (NYF). Не исключено, что с магматическим очагом может быть связано и уран-редкометалльно-редкоземельное оруденение жильного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корреляция магматических и метаморфических комплексов западной части Алтае-Саянской складчатой области / С.П. Шокальский, Г.А. Бабин, А.Г. Владимиров, С.М. Борисов и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2000. – 187 с.
2. Vigneresse J.L. The role of discontinuous magma inputs in felsic magma and ore generation // *Ore geology Reviews*. – 2007. – V. 30. – P. 181–216.
3. Гаврюшкина О.А., Травин А.В., Крук Н.Н. Длительность формирования пермо-триасовых гранитоидов Алтая (по данным ⁴⁰Ar–³⁹Ar изотопных исследований) // *Корреляция Алтаид и Уралид: магматизм, метаморфизм, стратиграфия, геохронология, геодинамика и металлогения. Материалы 3 Международной конференции*. – Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения академии наук, 2016. – С. 58–59.
4. Anders E., Greevesse N. Abundances of the elements: meteoric and solar // *Geochim. Cosmochim. Acta*. – 1989. – V. 53. – P. 197–214.
5. Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids // *Geological Soc. America Bulletin*. – 1989. – V. 101. – P. 635–643.
6. Villaseca C., Barbero L., Herreros V. A re-examination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts // *Trans. of Royal Soc. of Edinburgh Earth Science*. – 1998. – V. 89. – P. 113–119.
7. A geochemical classification for granitic rocks / B.R. Frost, C.G. Barnes, W.J. Collins, R.J. Arculus, D.J. Ellis, C.D. Frost // *Journal of Petrology*. – 2001. – V. 42. – P. 2033–2048.

8. Clemens J.D., Holloway J.R., White A.J.R. Origin of an A-type granite: experimental constraints // *American Mineralogist*. – 1986. – V. 71. – P. 317–324.
9. Skjerlie K.P., Johnston A.D. Vapor-absent melting at 10 kbar of a biotite- and amphibole-bearing tonalitic gneiss: implications for the generation of A-type granites // *Geology*. – 1992. – V. 20. – P. 263–266.
10. Patiño Douce A.E. Generation of metaaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids // *Geology*. – 1997. – V. 25. – P. 743–746.
11. Partial melting of apatite-bearing charnockite, granulite, and diorite: melt compositions, restite mineralogy, and petrologic implications // *J.S. Beard, G.E. Lofgren, A.K. Sinha, R.P. Tollo // Journal of Geophysical Research*. – 1994. – V. 99. – P. 21591–21603.
12. Ножкин А.Д., Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в коллизионных и внутриплитных натрий-калиевых гранитоидах: уровни накопления, значение для металлогении // *Геохимия*. – 2014. – № 9. – С. 807–809.
13. Peccerillo A., Taylor S.R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1976. – V. 58. – P. 63–81.
14. Richards J.P., Kerrich R. Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis // *Economic Geology*. – 2007. – V. 102. – P. 537–576.
15. The generation of high Sr/Y plutons following Late Jurassic arc–arc collision, Blue Mountains province, NE Oregon // *J.J. Schwartz, K. Johnson, E.A. Miranda, J.L. Wooden // Lithos*. – 2011. – V. 126. – P. 22–41.
16. Geochemical, Sr-Nd-Pb, and zircon Hf-O isotopic compositions of Eocene-Oligocene shoshonitic and potassic adakite-like felsic intrusions in Western Yunnan, SW China: Petrogenesis and tectonic implications // *Y.-J. Lu, R. Kerrich, T.C. McCuaig, Z.-X. Li, C.J.R. Hart, P.A. Cawood, Z.-Q. Hou, L. Bagas, J. Cliff, E. Belousova, S.-H. Tang // Journal of Petrology*. – 2013. – V. 54. – P. 1309–1348.
17. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3·8 GPa // *R.P. Rapp, N. Shimizu, M.D. Norman, G.S. Applegate // Chemical Geology*. – 1999. – V. 160. – P. 335–356.
18. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization // *Q. Wang, J.F. Xu, P. Jian, Z.W. Bao, Z.H. Zhao, C.F. Li, X.L. Xiong, J.L. Ma // Journal of Petrology*. – 2006. – V. 47. – P. 119–144.
19. Foley S.F., Tiepolo M., Vannucci R. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones // *Nature*. – 2002. – V. 417. – P. 837–840.
20. Mechanisms of Archean crust formation inferred from high-precision HFSE systematics in TTGs // *J.E. Hoffmann, C. Münker, T. Næraa, M.T. Rosing, D. Herwartz, D. Garbe-Schönberg, H. Svahnberg // Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2011. – V. 75. – P. 4157–4178.
21. Гусев А.И. Петрогенезис совмещенных шошонитовых и высоко-К адakitовых гранитоидов раннего мезозоя Горного Алтая // *Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)*. – Иркутск, Институт земной коры СО РАН, 2016. – С. 58–60.
22. Crustal melting and magma mixing in a continental arc setting: Evidence from the Yaloman intrusive complex in the Gorniy Altai terrane, Central Asian Orogenic Belt // *M. Chen, M. Sun, M.M. Buslov, K. Cai, G. Zhao, A.V. Kulikova, E.S. Rubanova // Lithos*. – 2016. – V. 252–253. – P. 76–91.
23. Jeong-Im O., Sung H. C., Keewook Y. Origin of adakite-like plutons in southern Korea // *Lithos*. – 2016. – V. 262. – P. 620–635.
24. Partial melting of subducted paleo-Pacific plate during the early Cretaceous: Constraint from adakitic rocks in the Shaxi porphyry Cu–Au deposit, Lower Yangtze River Belt // *J. Deng, X. Yang, S. Li, H. Gu, A.S. Mastoi, W. Sun // Lithos*. – 2016. – V. 262. – P. 651–667.
25. London D. Pegmatites // *The Canadian Mineralogist*. – 2008. – Special Publication 10. – 345 p.
26. Cerný P., Ercit T.S. The classification of granitic pegmatites revisited // *The Canadian Mineralogist*. – 2005. – V. 43. – P. 2005–2026.
27. The P–Fe diagram for K-feldspars: A preliminary approach in the discrimination of pegmatites // *L. Sánchez-Munoz, A. Müller, S.L. Andrés, R.F. Martin, P.J. Modreski, O.M. de Moura // Lithos*, 2017. – V. 272–273. – P. 116–127.

Поступила 12.02.2017 г.

Информация об авторах

Гусев А.И., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры естественно-научных дисциплин, безопасности жизнедеятельности и туризма естественно-географического факультета Алтайского государственного гуманитарно-педагогического университета им. В.М. Шукшина.

Гусев Н.И., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий отделом Восточной Сибири Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского.

Табакаева Е.М., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник управления научно-исследовательской деятельности Алтайского государственного гуманитарно-педагогического университета им. В.М. Шукшина.

UDC 552.3:550.4:550.42:550.93

ABSOLUTE AGE, PETROLOGY, GEOCHEMISTRY AND ORE MINERALIZATION OF TOCHILNY STOCK IN GORNY ALTAI

Anatoliy I. Gusev¹,
anzerg@mail.ru

Nikolay I. Gusev²,
Nicolay_Gusev@mail.ru

Evgeniya M. Tabakaeva¹,
tabakaeva16@mail.ru

¹ Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University,
53, Vladimir Korolenko, Biysk, 659333, Russia.

² A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute,
74, Sredny prospect, Saint-Petersburg, 199106, Russia.

The relevance of the discussed issue is caused by the need of researching absolute age, petrology, geochemistry and ore mineralization of Tochilny stock which is represented by strong fractionated rocks from melanosyenite to leucogranite. Different types of ore mineralization of rare earth pegmatites and jeweller-ornamental stones are related to such rocks spatially and paragenetically.

The main aim of the research is to study absolute age, petrology, geochemical features of rocks and ore mineralization of Tochilny stock using the experimental diagrams, which allow solving the genetic problems and the physic-chemical features of petrogenesis.

The methods used in the study. Rare and scattered elements were determined in rocks by inductively coupled plasma method on the mass spectrometer «OPTIMA-4300», the rest elements, including REE, were determined by La-ISP-MS methods in the Laboratory VSEGEI (Saint-Petersburg) and OIGaG SO RAN (Novosibirsk). The absolute age of forming rocks was determined by U-Pb SIMS (ion micro-zond SHRIMP –II) method on zircon in the Laboratory VSEGEI (Saint-Petersburg).

Results. The paper introduces the data on absolute age, geochemistry and petrology of granitoids of Tochilny stock and its ore mineralization. Melanosyenite, syenite, granite-porphyre and leucogranite were revealed in the stock. Stock formation lasts for prolong period in 24 mln. years (from 238 to 262 mln. years). So long period of forming caused by combining derivatives of high-K shoshonitic series rocks and high-K adakite-like differences in one stock. Considering the Nb>Ta ratio in rocks one can assume melting of amphibole-containing source, meeting the high-Nb basalts (NEB) of thickened lower earth crust. This subcontinental lithospheric mantle, transformed by basalt magmas, generated at subduction ocean lithosphere melting, was transformed under the effect of plume source. Rare metal pegmatites, related to granitoids of Tochilny stock, refer to the Nb>Ta-Y-F (NYF) family. According to the geochemical data pegmatites refer to rare earth elements class (REE) enriched with Zr, Ta, Nb. The tetradic effect of REE M-type fractionation occurs in syenites.

Key words:

Geochemistry, petrology, melanosyenite, syenite, granite-porphyre, leucogranite, zircon, absolute age, rare metal pegmatite, tetradic effect of REE fractionation.

REFERENCES

- Shokalsky S.P., Babin G.A., Vladimirov A.G., Borisov S.M. *Korrelyatsiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov zapadnoy chasti Altae-Sayanskoy sklachatoy oblasti* [Correlation of magmatic and metamorphic complexes of the western part of the Altai-Sayan folded region]. Novosibirsk, SB RAN Press, filial «Geo», 2000. 187 p.
- Vigneress J.L. The role of discontinuous magma inputs in felsic magma and ore generation. *Ore geology Reviews*, 2007, vol. 30, no. 3–4, pp. 181–216. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.03.001>
- Gavryushkina O.A., Travin A.V., Kruk N.N. Dlitelnost formirovaniya permo-triasovyykh granitoidov Altaya (po dannym ⁴⁰Ar–³⁹Ar izotopnykh issledovaniy) [Long-duration of forming Permo-Triassic granitoids of Altai (on data of ⁴⁰Ar–³⁹Ar isotopic researching)]. *Korrelyatsiya Altaid i Uralid: magmatizm, metamorfizm, stratigrafiya, geokhronologiya, geodinamika i metallogeniya. Materialy 3 mezhdunarodnoy konferentsii* [Correlation of Altaid and Uralid: magmatism, metamorphism, stratigraphy, geochronology, geodynamic and metallogeny. Materials of the 3rd International conference]. Novosibirsk, Siberian branch of Academy Science Publ. House, 2016. pp. 58–59.
- Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements: Meteoritic and solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, vol. 53, no. 1, pp. 197–214. DOI: [10.1016/0016-7037\(89\)90286-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90286-X)
- Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, vol. 101, no. 5, pp. 635–643. DOI: [10.1130/0016-7606\(1989\)101<0635:TDOG>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TDOG>2.3.CO;2)
- Villaseca C., Barbero L., Herreros V. A re-examination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 1998, vol. 89, no. 2, pp. 113–119. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0263593300007045>
- Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, 2001, vol. 42, no. 11, pp. 2033–2048. DOI: <https://doi.org/10.1093/petrology/42.11.2033>
- Clemens J.D., Holloway J.R., White A.J.R. Origin of an A-type granite: experimental constraints. *American Mineralogist*, 1986, vol. 71, pp. 317–324.
- Skjerlie K.P., Johnston A.D. Vapor-absent melting at 10 kbar of a biotite- and amphibole-bearing tonalitic gneiss: implications for the generation of A-type granites. *Geology*, 1992, vol. 20, no. 3, pp. 263–266. DOI: [10.1130/0091-7613\(1992\)020<0263:VAMAKO>?2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0263:VAMAKO>?2.3.CO;2)

10. Patiño Douce A.E. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids. *Geology*, 1997, vol. 25, no. 8, pp. 743–746. DOI: 10.1130/0091-7613(1997)025<0743:GOMATG>2.3.CO;2
11. Beard J.S., Lofgren G.E., Sinha A.K., Tollo R.P. Partial melting of apatite-bearing charnockite, granulite, and diorite: melt compositions, restite mineralogy, and petrologic implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1994, vol. 99, no. B11, pp. 21591–21603. DOI: 10.1029/94JB02060
12. Nozhkin A.D., Rikhvanov L.P. Radioactive elements in collisional and within-plate Sodic-Potassic Granitoids: Accumulation levels and metallogenic significance. *Geochemistry International*, 2014, vol. 52, no. 9, pp. 740–757. In Rus. DOI: 10.1134/S0016702914090080
13. Peccerillo A., Taylor S.R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, vol. 58, no. 1, pp. 63–81. DOI: 10.1007/BF00384745
14. Richards J.P., Kerrich R. Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis. *Economic Geology*, 2007, vol. 102, no. 4, pp. 537–576. DOI: 10.2113/gsecongeo.102.4.537
15. Schwartz J.J., Johnson K., Miranda E.A., Wooden J.L. The generation of high Sr/Y plutons following Late Jurassic arc–arc collision, Blue Mountains province, NE Oregon. *Lithos*, 2011, vol. 126, no. 1–2, pp. 22–41. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2011.05.005>
16. Lu Y.-J., Kerrich R., McCuaig T.C., Li Z.-X., Hart C.J.R., Cawood P.A., Hou Z.-Q., Bagas L., Cliff J., Belousova E., Tang S.-H. Geochemical, Sr-Nd-Pb, and zircon Hf-O isotopic compositions of Eocene-Oligocene shoshonitic and potassic adakite-like felsic intrusions in Western Yunnan, SW China: Petrogenesis and tectonic implications. *Journal of Petrology*, 2013, vol. 54, no. 7, pp. 1309–1348. DOI: <https://doi.org/10.1093/petrology/egt013>
17. Rapp R.P., Shimizu N., Norman M.D., Applegate G.S. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 1999, vol. 160, no. 4, pp. 335–356. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00106-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00106-0)
18. Wang Q., Xu J.F., Jian P., Bao Z.-W., Zhao Z.-H., Li C.-F., Xiong X.L., Ma J.L. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *Journal of Petrology*, 2005, vol. 47, no. 1, pp. 119–144. DOI: <https://doi.org/10.1093/petrology/egi070>
19. Foley S.F., Tiepolo M., Vannucci R. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones. *Nature*, 2002, vol. 417, no. 6891, pp. 837–840. DOI: 10.1038/nature00799
20. Hoffmann J.E., Münker C., Næraa T., Rosing M.T., Herwartz D., Garbe-Schönberg D., Svahnberg H. Mechanisms of Archean crust formation inferred from high-precision HFSE systematics in TTGs. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, vol. 75, no. 15, pp. 4157–4178. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2011.04.027>
21. Gusev A.I. Petrogenesis sovmeshchennykh shoshonitovykh i vysokok-K adakitovykh granitoidov rannego mezozoya Gornogo Altaya [Petrogenesis of reconcile shoshonitic and high-K adakitic granitoids of early Mesozoic of Gorny Altai]. *Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentralno-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu)* [Geodynamic evolution of lithosphere Central-Asian mobile belt (from ocean to continent)]. Irkutsk, Institute of Erath crust SB RAS, 2016. pp. 58–60.
22. Chen M., Sun M., Buslov M.M., Cai K., Zhao G., Kulikova A.V., Rubanova E.S. Crustal melting and magma mixing in a continental arc setting: Evidence from the Yaloman intrusive complex in the Gorny Altai terrane, Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 2016, vol. 252–253, pp. 76–91. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2016.02.016>
23. Oh J.-I., Choi S.H., Yi K. Origin of adakite-like plutons in southern Korea. *Lithos*, 2016, vol. 262, pp. 620–635. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2016.07.040>
24. Deng J., Yang X., Li S., Gu H., Mastoi A.S., Sun W. Partial melting of subducted paleo-Pacific plate during the early Cretaceous: Constraint from adakitic rocks in the Shaxi porphyry Cu-Au deposit, Lower Yangtze River Belt. *Lithos*, 2016, vol. 262, pp. 651–667. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2016.07.039>
25. London D. Pegmatites. *The Canadian Mineralogist*, 2008, Special Publication 10, 345 p.
26. Černý P., Ercit T.S. The classification of granitic pegmatites revisited. *The Canadian Mineralogist*, 2005, vol. 43, no. 6, pp. 2005–2026. DOI: 10.2113/gscanmin.43.6.2005
27. Sánchez-Munoz L., Müller A., Andrés S.L., Martín R.F., Modreski P.J., de Moura O.M. The P – Fe diagram for K-feldspars: A preliminary approach in the discrimination of pegmatites. *Lithos*, 2017, vol. 272–273, pp. 116–127.

Received: 12 February 2017.

Information about the authors

Anatoliy I. Gusev, Dr. Sc., professor, Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University.

Nikolay I. Gusev, Cand. Sc., head of the department, A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute.

Evgeniya M. Tabakaeva, Cand. Sc., researcher, Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University.

УДК 551.510.04

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ РОССИЙСКОГО ЗАПОЛЯРЬЯ

Семенец Елена Сергеевна¹,
elena573s@yandex.ru

Свистов Петр Филиппович¹,
svistov.pf@gmail.com

Талаш Александр Сергеевич²,
aleksandr.talash@gmail.com

¹ Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова,
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7.

² Национальный центр управления в кризисных ситуациях МЧС России,
Россия, 109012, г. Москва, ул. Ватутина, 1.

Актуальность изучения химического состава атмосферных осадков обусловлена необходимостью контроля процессов миграции и трансформации загрязняющих веществ, определяющих нагрузку на подстилающую поверхность.

Целью данной работы является обобщение результатов измерений основных макро- и микропоказателей химического состава атмосферных осадков Российского Заполярья за период времени с 2007 по 2015 гг., включая результаты, полученные в ходе совместной программы Федерального государственного бюджетного учреждения Арктического и антарктического научно-исследовательского института и Федерального государственного бюджетного учреждения «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» на ледовой станции СП-35 в 2007–2008 гг.

Методы исследования: теоретический анализ, сопоставление и обобщение имеющихся данных наблюдений.

Результаты. При самой низкой минерализации содержание микроэлементов (тяжелых металлов) составило около 12 %. Повышенное содержание тяжелых металлов в Центральной Арктике наблюдается и при более высокой сумме ионов, а максимальная кислотность атмосферных осадков соответствует величине $pH=4,7$. Полученные значения концентраций тяжелых металлов (свинца и кадмия) в атмосферных осадках ледовой станции СП-35 не превышали среднегодовые фоновые концентрации.

Выводы. Причины повышенного содержания тяжелых металлов в пробах атмосферных осадков остаются практически неясными. Очевидна настоятельная необходимость не только продолжить, но и организовать по специальной программе регулярные наблюдения за кислотностью и химическим составом атмосферных осадков на акватории Северного Ледовитого океана. При этом следует расширить перечень компонентов, анализируемых в атмосферных осадках, включив в него тяжелые металлы.

Ключевые слова:

Природные условия, атмосферные осадки, химический состав, кислотность, окружающая среда, влажные выпадения, региональный фон.

Введение

Арктический бассейн служит прекрасным воздушным фильтром северного полушария Земли, очищая атмосферу по одним компонентам и перераспределяя загрязнение воздуха по другим [1]. Отличительной особенностью окружающей среды арктического региона является ее уязвимость, которая определяется воздействием на нее процессов миграции и трансформации загрязняющих веществ [2]. В этой связи изучение химического состава атмосферных осадков приобретает немаловажное значение. Химический состав атмосферных осадков является не только интегральной характеристикой содержания примесей в облачном и подоблачном слое атмосферы, но и индикатором переноса примесей на значительные расстояния [3]. К числу факторов, влияющих на химический состав атмосферных осадков на территории Российского Заполярья, относят морскую поверхность и перенос воздушных масс из промышленно-развитых регионов России, Северной и Центральной Ев-

ропы. В составе атмосферных осадков, как правило, преобладают водорастворимые сульфаты и хлориды щелочных и щелочно-земельных металлов [2]. В виде ничтожной, но постоянно присутствующей примеси в осадках находятся тяжелые металлы. Их происхождение до конца не выяснено. Общепринято, что повышенное содержание ряда тяжелых металлов в атмосферных осадках свидетельствует о наличии техногенных источников загрязнения [4]. Однако на значительном удалении от промышленных центров концентрации тяжелых металлов в атмосферных осадках могут определяться и природными факторами. В любом случае атмосферные осадки, являясь важным источником поступления не только морских солей, но и тяжелых металлов, вносят существенный вклад в цикл биогеохимических процессов Арктики [2].

Таким образом, цель данной работы заключалась в выявлении особенностей в химическом составе атмосферных осадков на территории Российского Заполярья.

Материалы и методы исследования

В настоящее время на территории Российского Заполярья расположены 22 станции, в программу наблюдений которых входит отбор проб атмосферных осадков для последующего определения химического состава и кислотности [5]. В рамках национальной программы мониторинга химизма и кислотности атмосферных осадков в месячных пробах определяются 11 главных показателей. К ним относятся: удельная электропроводность (k), величина кислотности (pH), а также содержание основных ионов – гидрокарбонат-, хлорид-, сульфат-, нитрат-ионов, ионов аммония, калия, натрия, магния и кальция. В суточных (или единичных) пробах атмосферных осадков определяется только показатель pH .

По общности атмосферных процессов и другим природным показателям регион Российского Заполярья принято разделять на три сектора [6]:

- Атлантический (от западной границы до предгорий Полярного Урала), на территории которого расположены станции Зареченск, Падун, Мурманск, Краснощелье, Мудьюг, Архангельск, Северодвинск, Онега, Сура, Ухта и Нарьян-Мар;
- Сибирский (восточнее Полярного Урала до северной части бассейна реки Лены) с пунктами наблюдений Уренгой, Диксон, Туруханск, Норильск, Полярный, Жиганск, Кюсюр, Тикси;
- Тихоокеанский с пунктами Депутатский, Усть-Мома и Палатка.

Следует отметить, что некоторые станции расположены значительно южнее Полярного круга, а деление на географические районы часто бывает условным и не всегда совпадает с делением на климатические области.

В течение 2007–2008 гг. в рамках совместной программы Федерального государственного бюджетного учреждения Арктического и антарктического научно-исследовательского института и Федерального государственного бюджетного учреждения «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» были организованы отборы проб на ледовой станции СП-35. Начало наблюдений было положено в июле 2007 г. В летний период 2007 г. отбирались пробы отдельных выпадений осадков (единичные пробы) на Ледовой базе (ЛБ-35). В течение осенне-зимнего периода (октябрь 2007 г. – март 2008 г.) отбирались месячные пробы атмосферных осадков на дрейфующей льдине СП-35. Все пробы отбирались по методике, принятой для российских станций, осуществляющих регулярные наблюдения за химическим составом атмосферных осадков. Помимо 11 главных показателей в пробах анализировалось также содержание тяжелых металлов – железа, цинка, никеля, марганца, меди, свинца, хрома и кадмия.

Траектория дрейфа СП-35 проходила в пределах абиссальной равнины Баренца (котловина Нансена) от точки $81^{\circ}27'N$ $115^{\circ}19'E$ до точки $81^{\circ}15'N$ $29^{\circ}15'E$. В течение 284 дней с 21.09.2007

по 30.06.2008 г. в автономном режиме станция прошла 2422 км со средней скоростью 8,5 км/сутки. Льдина начинала свой путь от северо-восточного побережья Северной Земли и двигалась в северо-западном, затем в западном направлении (к Земле Франца-Иосифа).

Таким образом, были обработаны ежемесячные данные о химическом составе атмосферных осадков 22-х станций Российского Заполярья за период времени с 2007 по 2015 гг. Также были проанализированы ежемесячные и единичные данные о химическом составе атмосферных осадков на Ледовой базе (ЛБ-35) и дрейфующей льдине СП-35 в течение осенне-зимнего периода 2007–2008 гг.

Средние за год значения концентраций основных веществ в химическом составе атмосферных осадков рассчитывались либо как среднеарифметические концентрации, либо как средневзвешенные годовые концентрации. Средневзвешенные концентрации ионов в лучшей степени, чем среднеарифметические, отражают среднюю концентрацию ионов в годовой сумме осадков и среднюю годовую нагрузку на подстилающую поверхность, так как учитывают не только концентрацию веществ в отбираемых пробах, но и количество осадков. Средневзвешенные концентрации были вычислены по формуле (1):

$$\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot q_i}{\sum_{i=1}^n q_i}, \quad (1)$$

где \bar{C} – средневзвешенная концентрация вещества в атмосферных осадках, мг/л; C_i – концентрация вещества в пробе, мг/л; q_i – количество осадков за месяц, мм; n – число месяцев с осадками.

Ошибка средней величины концентрации компонента в химическом составе атмосферных осадков вычислялась по формуле (2):

$$\Delta_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n-1}}, \quad (2)$$

где Δ_x – ошибка средней величины, σ – среднеквадратическое отклонение, n – объем выборки.

Химический состав атмосферных осадков Российского Заполярья

Обобщенные характеристики ионного состава осадков (удельная электропроводность k и величина pH), а также средневзвешенные годовые концентрации ионов по месячным данным 2015 г. сведены в табл. 1.

В химическом составе атмосферных осадков преобладают сульфат-ионы. Их содержание составляет 26, 42 и 35 % соответственно в Атлантическом, Сибирском и Тихоокеанском секторе. «Второе» место «поделили» между собой хлорид- и гидрокарбонат-ионы. В атлантическом секторе их относительно суммарное содержание составляет 35 % и превышает содержание сульфат-ионов. На хлорид- и гидрокарбонат-ионы в Сибирском

Таблица 1. Средневзвешенные концентрации основных ионов в 2015 г.

Table 1. Weighted average concentrations of major ions in 2015

Сектор Sector	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	M	pH	k, мкСм/см
	мг/л/mg/L											
Атлантический/Atlantic	2,8	1,8	0,9	2,1	0,2	0,9	0,6	1,2	0,3	10,8	5,8	25,2
Сибирский/Siberian	13,4	2,6	0,7	7,1	0,6	1,7	1,0	2,0	2,5	31,6	6,1	70,7
Тихоокеанский/ Pacific	3,6	0,7	0,8	2,7	0,4	0,5	0,4	0,9	0,3	10,3	5,8	24,6

секторе приходится 31 % от общей суммы макрокомпонентов, причем доля гидрокарбонат-ионов составляет 22 %. Для атмосферных осадков Тихоокеанского сектора характерно относительно одинаковое содержание хлорид- и нитрат-ионов (7 и 8 % соответственно). Доля гидрокарбонат-ионов составляет 26 %. Такое распределение основных анионов может свидетельствовать о большей континентальности станций, расположенных в Сибирском и Тихоокеанском секторах.

Средневзвешенные концентрации нитратов примерно одинаковые для всей территории Российского Заполярья, и в среднем составляют 0,7 мг/л. Концентрации ионов аммония по сравнению с Атлантическим сектором выше в 3 и 2 раза соответственно в Сибирском и Тихоокеанском секторах. Из катионов преобладают кальций и натрий с заметно более высоким содержанием магния в Сибирском секторе.

На рис. 1 представлен временной ход концентраций ионов в атмосферных осадках Заполярья.

Характер колебаний временного хода основных анионов указывает на сравнительно небольшие различия их качественного и количественного состава в Атлантическом и Тихоокеанском секторах. Сибирский сектор выделяется не только повышенным содержанием сульфатов, гидрокарбонатов и хлоридов, но и заметной временной изменчивостью, а также некоторой тенденцией к снижению общей минерализации осадков. Высокие концентрации ионов в 2010–2011 гг., а также их значительные колебания связаны, возможно, с последствиями лесных пожаров.

Колебания кислотности атмосферных осадков Российского Заполярья

Кислотность атмосферных осадков относится к одному из самых неустойчивых параметров [7]. На кислотность осадков оказывают влияние, прежде всего, диоксиды углерода, серы и азота, их соли, а также аммонийные соединения. Окончательное равновесие в выпавших осадках устанавливается

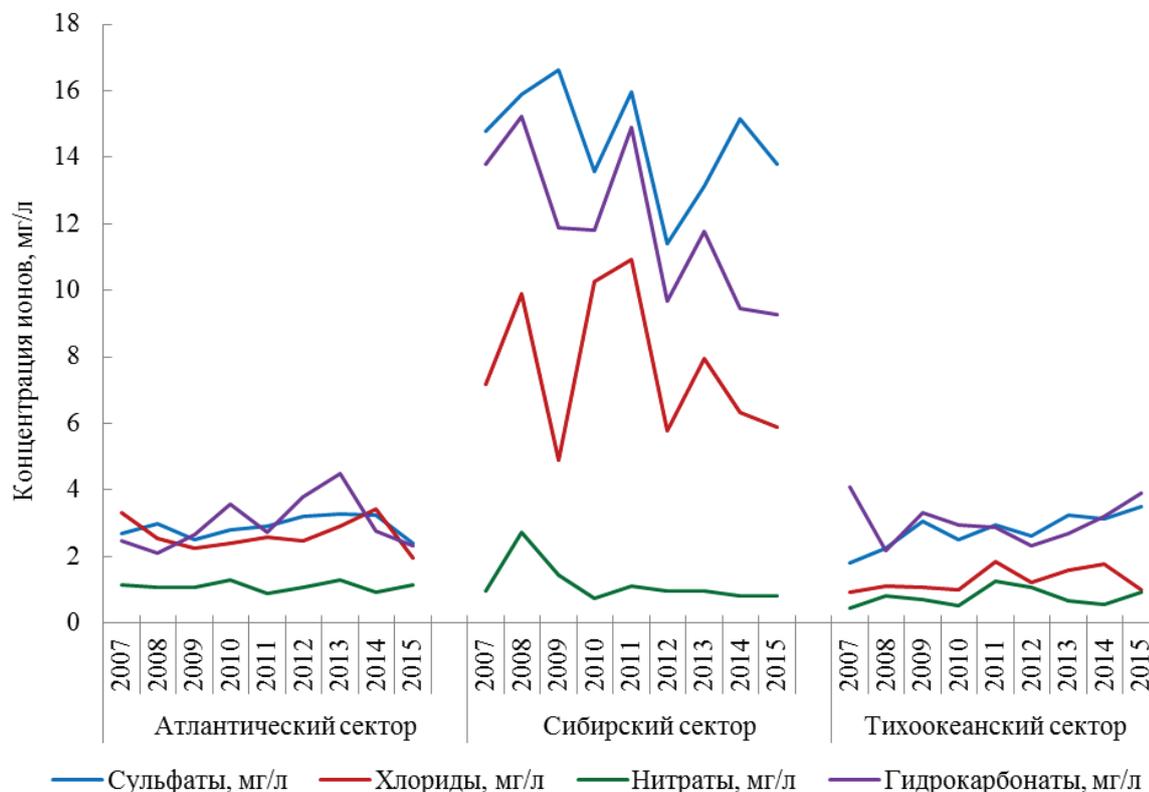


Рис. 1. Ход изменения со временем концентрации основных ионов в атмосферных осадках по секторам Заполярья, 2007–2015 гг.

Fig. 1. Annual variations of major ions concentrations and pH across the different sectors of the Russian arctic, 2007–2015

Таблица 2. Повторяемость значений величины рН в атмосферных осадках, 2007–2015 гг.

Table 2. Frequency distribution of precipitation pH, 2007–2015

Сектор/Sector	pH<4,5	4,5≤pH<5,0	5,0≤pH<5,5	5,5≤pH<6,0	pH≤6,0
Атлантический/Atlantic	9,5	10,2	12,6	20,9	46,8
Сибирский/Siberian	0,1	0,9	5,0	23,3	70,7
Тихоокеанский/Pacific	2,4	5,6	7,3	29,0	55,7

примерно через 10–15 суток, учитывая переход сульфитов и нитритов соответственно в сульфаты и нитраты [8]. Типичным природным кислотообразующим веществом является диоксид углерода. При среднем содержании диоксида углерода в атмосфере, равном 330 млн⁻¹, концентрация ионов водорода в равновесном водном растворе при 20 °С составит $2,5 \cdot 10^{-6}$ моль/л, а рН соответственно будет равен 5,6. Принято считать, что именно такое равновесное значение рН должны иметь незагрязненные атмосферные осадки в отсутствие других примесей [9]. В разных районах земного шара величина кислотности атмосферных осадков (рН), изменяется в широких пределах – от менее 4,0 до более 7,0 [10].

Повторяемость значений (%) величины рН в атмосферных осадках представлена в табл. 2.

Повторяемость выпадений кислых осадков (рН<5,0) составила 20, 1 и 8 % соответственно в Атлантическом, Сибирском и Тихоокеанском секторах. Вероятность выпадения осадков с высокой кислотностью (рН<4,5) весьма мала для Сибирского региона, в то время как в Атлантическом и Тихоокеанском регионах вероятность выпадения таких осадков составила соответственно 9,5 и 2,4 %. Осадки со значением рН≤6,0 наиболее характерны для Сибирского региона. Временной ход среднегодовой величины кислотности осадков представлен на рис. 2.

Временной ход величины рН осадков чрезвычайно изменчив на заполярных станциях. Наиболее кислые осадки постоянно выпадают на крайнем Северо-Западе РФ [11]. Но в то же время для Атлантического сектора характерна тенденция к уменьшению среднегодовой величины кислотности осадков.

Состав осадков в Центральной Арктике

Северный Ледовитый океан, в отличие от других океанов, не поставляет влагу в атмосферу и ежегодно из мирового влагооборота забирает более 2000 кубометров воды. Циклоны и антициклоны образуются редко в этой зоне; они приходят со стороны. Так называемые арктические фронты на азиатской территории РФ, проходя вдоль побережья летом, опускаются зимой до широты Палатки (60,1° с.ш., 150,9° в.д.). Постоянно высокое давление сохраняется круглый год только над плато Гренландии. Практически Арктика не имеет собственных техногенных источников загрязнения воздуха. Особенности распределения и загрязнения осадков в Арктике зависят (как и повсеместно) от трех основных факторов: характера атмосферной циркуляции, прихода и расхода тепла, а также многообразных воздействий подстилающей поверхности. Полярные день и ночь, большие площади дрейфующих льдов и полыньи создают специфические условия режима увлажнения воздуха и

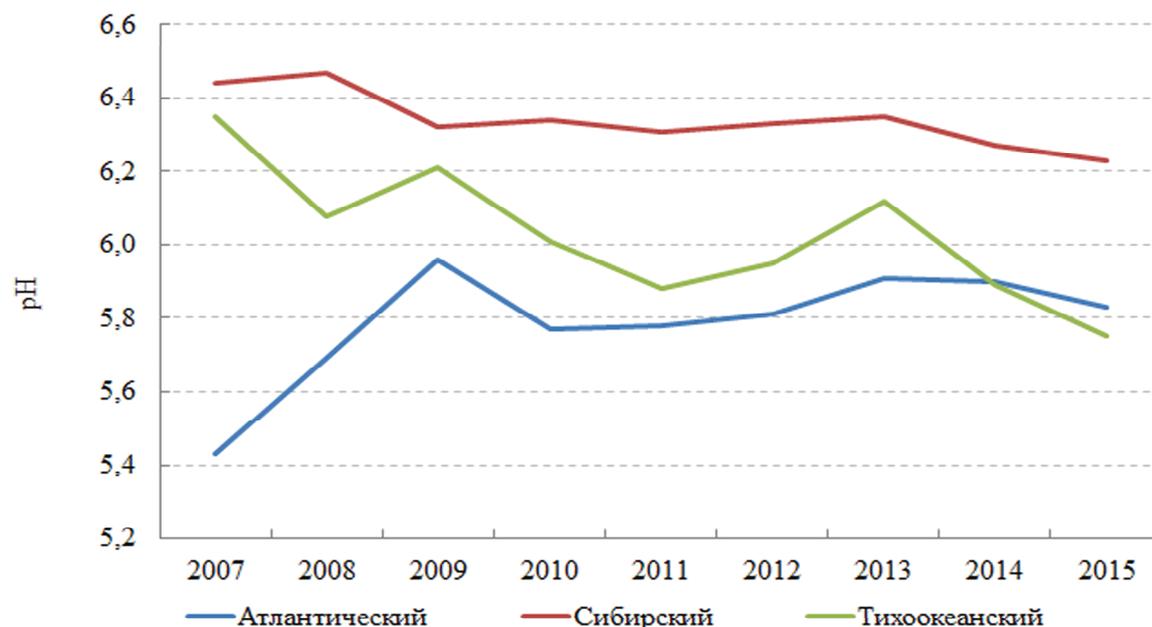


Рис. 2. Временной ход среднегодовой величины рН, 2007–2015 гг.

Fig. 2. Average annual precipitation pH since 2007 to 2015

формирования химического состава осадков. В холодный период года, когда циклоническая деятельность наиболее развита, повторяемость выпадения осадков очень велика, но сумма их оказывается меньше летних осадков. Такое положение объясняется заметным уменьшением влагосодержания воздушных масс в связи с понижением температуры воздуха и ввиду их удаления в сторону Арктики от исландского и алеутского циклонических центров действия атмосферы. В летнее время, наряду с уменьшением повторяемости осадков, возрастает их интенсивность. В Арктике чаще, чем где-либо, выпадают мелкие фронтальные осадки из слоистых и слоисто-кучевых облаков. Внутри-массовые осадки составляют небольшую долю от общей суммы [12–16].

Влияние человеческой деятельности заметно сказывается на природных условиях не только урбанизированных территорий, но даже ледяного плато Северного Ледовитого океана. Оказалось, природа Арктики особенно чувствительна к наличию загрязнений в воздухе [1, 4, 6].

Наблюдения за аэрозолями в Арктике позволили выявить наиболее вероятные источники загрязнения ее атмосферы: локальные, региональные и попавшие сюда в результате дальнего переноса [12, 17].

В течение осенне-зимнего периода 2007–2008 гг. на ледовой станции СП-35 были организованы отборы месячных и единичных проб атмосферных осадков. Средняя за год сумма осадков в районе дрейфа льдины со станцией СП-35 (и ЛБ-35) была примерно 200 мм (200 л/м²-год) с многолетними колебаниями от 100 до 280 мм. Местные загрязнения здесь проявляются в осадках через периодическое повышенное содержание хлоридов, основным источником которого считают обычно открытые водные поверхности и прибрежные зоны «мирового океана». При размахе значений концентрации хлоридов от 0,2 до 1,1 мг/л в отдельных единичных измерениях и большинстве месячных осадков при среднем содержании 14,8 мг/л отношение хлора к натрию остается близким к 1,8, что является характерным для морской воды. Вглубь континента доля хлора в осадках обычно падает и появляется хлорид натрия терригенного (почвенного) происхождения.

В осадках на Ледовой базе (табл. 3) преобладают гидрокарбонаты (0,5–1,64 мг/л), затем следуют нитраты (0,04–0,6 мг/л) и сульфаты (0,03–0,44 мг/л). Их присутствие связывают с наличием в воздухе соответственно почвенной пыли, диоксидов азота и серы.

Конечно, возможно попадание в осадки сульфата магния из морской воды и образование карбонатов при растворении углекислого газа из воздуха. По средним значениям главные компоненты распределяются: гидрокарбонаты (0,96 мг/л), затем хлориды (0,66 мг/л), нитраты (0,20 мг/л) и сульфаты (0,17 мг/л). Связаны они в основном с кальцием (0,46 мг/л) и натрием (0,32 мг/л).

Таблица 3. Показатели химического состава единичных атмосферных осадков на Ледовой базе, 2007 г.

Table 3. Chemical composition parameters in event precipitation on the Ice Base, 2007

Параметры Parameters	Дата выпадения осадков/Sample period						
	19.06.	07.07.	11.07.	11.07.	01.08.	12.08.	07.09.
Сульфаты, мкг/л Sulfate, µg/L	50	30	70	440	130	90	370
Хлориды, мкг/л Chloride, µg/L	210	570	1060	740	570	710	780
Нитраты, мкг/л Nitrate, µg/L	40	40	140	60	600	200	300
Гидрокарбонаты, мкг/л Hydro carbonate, µg/L	490	1040	994	670	1640	1400	490
Аммоний, мкг/л Ammonium, µg/L	20	20	20	10	40	30	80
Натрий, мкг/л Sodium, µg/L	80	300	60	300	390	700	410
Калий, мкг/л Potassium, µg/L	10	10	140	40	50	90	50
Кальций, мкг/л Calcium, µg/L	190	490	670	530	550	280	490
Магний, мкг/л Magnesium, µg/L	30	50	110	100	90	60	90
Сумма ионов, мг/л Sum of ions, mg/L	1,12	2,55	3,8	2,89	4,06	3,56	3,6
Величина pH	5,73	6,05	5,85	5,87	5,8	6,1	5,7
Проводимость, к, мкСм/см Conductivity, µSm/cm	3	5	9	7	8	7	8
Железо, мкг/л Ferrum, µg/L	14,7	26,8	40,9	29,1	28,3	69,0	20,7
Цинк, мкг/л Zinc, µg/L	13,4	6,8	57,7	11,1	13,4	16,1	13,2
Никель, мкг/л Nickel, µg/L	111,5	141,2	31,1	135,2	141	129,7	140,9
Медь, мкг/л Cuprum, µg/L	2,5	3,5	8,1	2,3	5,4	13,4	6,9
Свинец, мкг/л Lead, µg/L	0,31	0,5	1,3	0,7	1,4	0,8	0,2
Хром, мкг/л Chrome, µg/L	0,15	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Кадмий, мкг/л Cadmium, µg/L	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

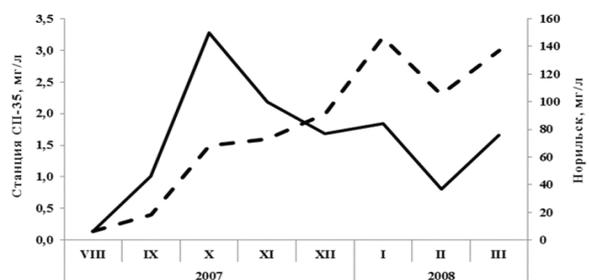


Рис. 3. Ход изменения концентрации сульфатов в атмосферных осадках на СП-35 (---) и в Норильске (—)

Fig. 3. Seasonal variation of sulfate concentration in precipitation of Ice Station (---) and Norilsk (—)

В подтверждение роли региональных источников в северо-восточном секторе Арктики сбор и хи-

мический анализ осадков проводили параллельно на дрейфующей льдине СП-35 и в Норильске (рис. 3). Характерно, что в августе абсолютной минимальной концентрации сульфатов на льдине соответствуют низкие значения в Норильске. Содержание сульфатов в Норильске выше, чем на СП-35, примерно в 40 раз.

Низкие значения концентраций сульфатов в атмосферных осадках на ледовой станции СП-35 отмечаются в летний период года. Максимальные значения концентраций сульфатов в осадках СП-35 характерны преимущественно для холодного периода и составляют свыше 1,5 мг/л. Причиной повышенного содержания сульфатов в осадках по сравнению с летним периодом может быть зимний перенос. Зимний перенос в Норильске происходит с более холодной суши на море в северо-западном и западном направлениях [18]. Это, по всей видимости, и приводит к региональному загрязнению западных секторов Арктики. Судя по максимальной кислотности и химическому составу осадков, вряд ли влияние Норильска распространяется до Салехарда или Нарьян-Мара. Направление муссона в то или иное полугодие не сохраняется здесь непрерывно, и нередко муссонное течение сменяется ветрами других направлений. В июне минерализация их и содержание основных компонентов (хлоридов, сульфатов, гидрокарбонатов, кальция и натрия) сравнимы с фоновыми, а концентрация никеля оказывается сверхвысокой – в среднем до 111,5 мкг/л. Более 45 % таких осадков поступает с северо-востока и севера, то есть от Североамериканского континента. Карта, приведенная в сообщении АМАР [1], также показывает, что РФ далеко не основной поставщик воздушного загрязнения Центральной Арктики.

Высокий уровень химического загрязнения воздуха в Арктике, по-видимому, стал причиной формирования так называемой арктической дымки, которая, следуя за распределением задерживающих слоёв, практически постоянно присутствует в атмосфере полярных широт (табл. 4). При этом загрязняющее вещество, опускаясь в одних местах, поднимается в других до тех пор, пока его начальная плавучесть и инерция вертикального движения не исчерпаются. Далее происходит только дрейф по потоку, часто в виде тонкой, почти невозмущенной ленты. Высота инверсий зимой находится в пределах 500–1000 м, и они словно прижаты к поверхности льда. Летом система циркуляции воздуха перестраивается, и высота инверсионного слоя увеличивается до 2000 м. Зимой практически над всей северной частью азиатской территории России и над окраинными морями повторяемость инверсий при среднем значении 70 достигает 87 %, в западной части Арктики уменьшаясь до 40–50 % [19].

Явление дымки было хорошо известно первым исследователям Арктики и её отмечают во многих местах [20, 21]. Открытие же стабильности, многослойности и качественного различия слоёв дымки

положило конец более ранним представлениям о том, что аэрозольное загрязнение может быть только локальным и региональным. В холодном и сухом воздухе полярных регионов некоторые частицы способны многие сутки оставаться во взвешенном состоянии, что позволяет различным соединениям мигрировать на большие расстояния.

Таблица 4. Повторяемость инверсий и химический состав атмосферных осадков в Центральной Арктике

Table 4. Frequency distribution of inversions and chemical composition of precipitation in the Central Arctic

Характеристика Characteristic	Месяцы/Months						
	I	II	III	VII	X	XII	VI–VIII
Повторяемость инверсий, % Inversion frequency, %	77	78	87	28	38	67	30
Никель, мкг/л Nickel, µg/L	37	245	72	102	64	110	116
Железо, мг/л Ferrum, mg/L	72	195	198	32	75	134	32
Проводимость k, мкСм/см Conductivity, µSm/cm	166	46	32	7	46	112	5,8
Кислотность, мкг/л Acidity, µg/L	3,8	5,2	4,7	1,2	0,5	11,2	1,4
Сульфаты, мг/л Sulfate, mg/L	3,2	2,3	2,0	0,2	1,0	2	0,1

При существующей системе циркуляции воздуха перенос загрязнителей из промышленно развитых регионов Европы, Азии и Северной Америки в Арктику в основном осуществляется в зимний, а вынос на континенты – в летний периоды [22]. Накопленные в инверсионных слоях вещества затем частично выпадают с атмосферными осадками (табл. 4).

Невероятно, но концентрации свинца и кадмия, относящиеся к супертоксикантам, оказались вполне сопоставимыми с теми, которые были получены для заповедников Центрального федерального округа России [23], где, однако, они составляют ничтожную долю от общей суммы ионов. Суммарная же доля тяжёлых металлов в Арктике достигает 12 %. В холодный период содержание железа, марганца и меди превышает экологическую норму в 2–8 раз, цинка – в 17, а никеля – более чем в 20 раз. Летом эти величины несколько меньше. В большинстве городских осадков содержание никеля, марганца, меди, свинца, хрома и кадмия обычно на два или три порядка ниже содержания основных компонентов [24]. К числу наиболее опасных для экосистем относятся никель и медь, содержание которых значительно превышает экологическую норму, а также свинец и кадмий ввиду низкого допустимого уровня [25].

По результатам измерений линейная связь содержания большинства тяжёлых металлов и основных компонентов отсутствует. Причина может крыться как в качественном различии источников загрязнения, так и в особенностях дальнейшего поведения главных компонентов и микроэлементов. Существенно различаются их физико-химиче-

ские характеристики. Все сульфаты, хлориды, нитраты, аммонийные соли и соли щелочных металлов гигроскопичны и хорошо растворимы в воде, в результате чего при постоянно высокой в Заполярье относительной влажности воздуха (>75 %) они легко выпадают ещё на подступах к центральной Арктике и при отсутствии осадков. Наиболее интенсивно этот процесс идет в летнее время, на что указывает низкая проводимость осадков. Доля микроэлементов увеличивается и на фоне низкой минерализации, когда связанное с этим изменение удельной электропроводности осадков становится заметным. В зимних осадках концентрация тяжелых металлов, не уступая летним, практически не оказывает влияния на их проводимость.

Микроэлементы присутствуют в атмосфере, по-видимому, в виде смеси сажи с мелкодисперсными аэрозолями оксидов металлов и, возможно, металлоорганических соединений. Все промышленные производства и, в меньшей степени, транспорт выбрасывают в атмосферу, помимо широко известных газов сажу, летучую золу, мелкодисперсную пыль, эфирные масла и жирные кислоты. Минеральная составляющая буквально пропитывается органическими веществами (сажа всегда кажется маслянистой). Эти вещества слабо растворимы в воде и плохо смачиваются. Инверсионные слои, накапливая их и задерживая вертикальный обмен, способствуют сохранению арктической дымки круглый год.

Непосредственно в облачных элементах концентрация тяжелых металлов, по-видимому, невелика, но влажные выпадения создают поток воздуха с аэрозолями, которые вместе с элементами осадков попадают в осадкосборники. Таким образом, процесс выведения загрязнений из воздуха на местном уровне складывается из условно сухих, сухо-влажностных и влажных выпадений (собственно осадки). На содержании тяжелых металлов, возможно, сказываются температурные и влажностные характеристики воздуха, продолжительность осадков. Кажется, только поведение железа

и цинка сопоставимо с распределением основных компонентов. Заметим, что в настоящее время на некоторых региональных станциях России цинк и железо наряду с магнием можно причислить к основным компонентам.

Сопоставление данных по химическому составу осадков в 2007 и 2008 гг. в Центральной Арктике и по континентальному Заполярье представлено в табл. 5. Для каждого сектора были выбраны станции в сельской местности и рассчитаны средние значения концентрации компонентов. В качестве фоновых станций взяты: Падун (Атлантический сектор), Туруханск (Сибирский) и Палатка (Дальневосточный).

По совместным данным СП-35 и ЛБ-35, в Центральной Арктике в осадках значительно преобладают хлориды местного происхождения, попадая туда, по-видимому, с метелью и в результате выноса хлорида натрия с разводий.

Максимальное содержание сульфатов и гидрокарбонатов приходится на Норильск, указывая на присутствие в воздухе большого количества диоксида серы и пыли в виде карбонатов. Распространяясь на юг и на север, концентрация сульфатов уменьшается в Туруханске до уровня 2,5 мг/л, превышающего фоновый примерно на 20 %, а на острове Диксон, расположенном севернее Норильска, примерно до 10 мг/л. На ледяном плато содержание сульфатов в среднем за год ниже регионального фонового уровня континентальной Арктики почти в 2 раза. Примерно также ведут себя гидрокарбонаты и кальций, характеризуя запыленность воздуха.

Выводы

Причины повышенного содержания тяжелых металлов в пробах атмосферных осадков остаются практически неясными. Очевидна настоятельная необходимость не только продолжить, но и организовать по специальной программе регулярные наблюдения за кислотностью и химическим составом атмосферных осадков на акватории Северного Ледовитого океана. При этом следует расширить пе-

Таблица 5. Количество осадков и химический состав атмосферных осадков в Заполярье по средним за год значениям, 2007 и 2008 гг.

Table 5. Annual mean concentrations of precipitation in the Russian Arctic, 2007–2008

Компонент Components	Заполярье/Subarctic							СП-35 Polar station	ЛБ-35 Ice station
	Атлантический/Atlantic		Сибирский/Siberian			Тихоокеанский/Pacific			
	сектор sector	Падун Padun	сектор sector	Норильск Norilsk	Туруханск Turukhansk	сектор sector	Палатка Palatka		
q, мм	618	530	485	470	640	310,2	462	200	200
SO ₄ ²⁻ , мг/л (mg/L)	2,7±0,4	2,0±0,1	12,1±0,8	90±9	2,2±0,2	1,5±0,2	2,1±0,3	1,2±0,3	0,2±0,1
Cl ⁻ , мг/л (mg/L)	3,4±0,8	1,1±0,2	10,8±3,1	5,1±0,5	0,8±0,1	0,8±0,3	0,7±0,2	14,8±0,2	0,7±0,1
HCO ₃ ⁻ , мг/л (mg/L)	2,4±0,8	0,1±0,1	8,4±2,3	23,4±0,2	3,6±0,2	3,3±1,0	2,7±0,6	0,9±0,1	1,0±0,2
Na ⁺ , мг/л (mg/L)	1,7±0,5	0,4±0,1	4,8±1,9	1,0±0,08	0,8±0,1	0,6±0,3	0,4±0,1	5,3±0,4	0,3±0,1
Ca ²⁺ , мг/л (mg/L)	1,2±0,2	0,4±0,02	2,2±0,7	7,6±0,6	0,5±0,04	0,7±0,1	1,1±0,1	1,6±0,1	0,5±0,1
M, мг/л (mg/L)	11,4±2,0	4,0±0,8	38,3±4,0	127±13	7,9±0,1	6,9±0,8	7,0±0,5	23,8±2,4	3,1±0,3
k, мкСм/см (µSm/cm)	28±4	15±4	103±10	301±30	19±0,3	19±4	13±2	55±6	6,7±0,8
pHcp/average pH	5,5±0,2	4,7±0,4	6,3±0,1	7,3±0,4	6,2±0,1	6,1±0,1	5,7±0,2	5,6±0,2	5,9±0,1

речень компонентов, анализируемых в атмосферных осадках, включив в него тяжелые металлы, такие как железо, кадмий, медь, никель, свинец, цинк, хром и ртуть.

В заключении кратко сформулируем основные положения изложенного материала.

- Качественный и количественный состав атмосферных осадков Атлантического и Тихоокеанского секторов слабо отличается.
- Наблюдается некоторая тенденция к снижению общей минерализации осадков в Сибирском секторе.

- Месячные значения pH осадков выше в Сибирском секторе, а абсолютная максимальная кислотность осадков характерна для атмосферных осадков Атлантического сектора.
- Сумма тяжелых металлов при самой низкой общей минерализации достигает 12 %.
- Полученные значения концентраций тяжелых металлов (кадмия и свинца) на СП-35 как в единичных, так и в месячных пробах атмосферных осадков не превышали среднегодовые фоновые концентрации в атмосферных осадках на территории РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. АМАР, 1998. АМАР Assessment Report: Arctic pollution Issues. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). – Oslo, Norway, 1998. – xii+859 p.
2. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. – М.: ИЦ «Академия», 2003. – 400 с.
3. Петренчук О.П. Экспериментальные исследования атмосферного аэрозоля. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 264 с.
4. АМАР, 2005. АМАР Assessment 2002: Heavy Metals in the Arctic. – Oslo, Norway, 2005. – xii+265 p.
5. Методическое письмо. Состояние работ по наблюдению за химическим составом и кислотностью атмосферных осадков в 2015 году. – СПб, 2016. – 56 с.
6. АМАР, 2006. АМАР Assessment 2006: Acidifying Pollutants, Arctic Haze, and Acidification in the Arctic. Arctic monitoring and Assessment Programme (AMAP). – Oslo, Norway, 2006. – xii+112 p.
7. Руководство по контролю загрязнения атмосферы РД 52.04.186–89. – М., 1991. – 696 с.
8. Свистов П.Ф., Талаш А.С., Семенов Е.С. О пространственно-временных изменениях кислотности атмосферных осадков // Климат и Природа. – 2016. – № 2 (19). – С. 14–26.
9. Кислотные дожди / Ю.А. Израэль, И.М. Назаров, А.Я. Пресман и др. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 269 с.
10. GAW Report No. 160. Manual for the GAW Precipitation Chemistry Programme. – WMO, 2004. – xii+170 p.
11. Першина Н.А., Полищук А.И., Свистов П.Ф. К вопросу о закислении атмосферных осадков в Российской Арктике // Труды ГГО. – 2008. – Вып. 558. – С. 211–232.
12. Диагностический анализ состояния окружающей среды Арктической зоны Российской Федерации / под ред. Б.А. Моргунова. – М.: Научный мир, 2011. – 124 с.
13. Ye H., Kalkstein L.S. The detection of climate change in the Arctic: an updated report // Atmospheric research. – 1995. – V. 37. – Iss. 1–3. – P. 163–173.
14. Прик З.М. Физико-географическое районирование Арктики. Ч. 1. – Л.: Гидрометиздат, 1967. – С. 15–48.
15. Физико-географическая характеристика Арктической зоны России. Обзор Росгидромета, 2011. – Гл. 1. – С. 14–46.
16. Overland J.E. A difficult Arctic Science issue: Midlatitude weather linkages // Polar Science. – 2016. – V. 10. – Iss. 3. – P. 210–216.
17. АМАР, 2015. АМАР Assessment 2015: Black carbon and ozone as Arctic climate forcers. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). – Oslo, Norway. – vii+116 p.
18. Архив погоды в Норильске // World Weather.ru. URL: <http://world-weather.ru/archive/russia/norilsk> (дата обращения 25.08.2016).
19. Quantifying the clear-sky temperature inversion frequency and strength over the Arctic Ocean during summer and winter seasons from AIRS profiles / A. Devasthale, U. Will, K.-G. Karlsson, C. G. Jones // Atmos. Chem. Phys. Discuss. – 2010. – V. 10. – P. 2835–2858. URL: <http://www.atmos-chem-phys.net/10/5565/2010/acp-10-5565-2010.pdf> (дата обращения: 25.08.2016).
20. Aerosol remote sensing in polar regions / C. Tomasi, A.A. Kokhanovsky, et al. // Earth-Science Review. – 2015. – V. 140. – P. 108–157.
21. Barrie L.A. Occurrence and trends of pollution in the Arctic troposphere // NATO ASI Series. – 1996. – V. 143. – P. 93–129.
22. Котова Е.И., Шевченко В.П. Влияние дальнего атмосферного переноса на формирование ионного состава атмосферных осадков и снежного покрова прибрежной зоны западного сектора Российской Арктики // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12–11. – С. 2378–2382. URL: <http://www.fundamental-research.ru/pdf/2014/12-11/36699.pdf> (дата обращения 10.10.2016).
23. Майстренко В.Н., Хамитов Р.З., Будников Г.К. Эколого-аналитический мониторинг супертоксикантов. – М.: Изд-во «Химия», 1996. – 320 с.
24. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды. Справочные материалы / под ред. Т.В. Гусевой. – М.: Изд-во «ФОРУМ-ИНФРА-М», 2007. – С. 93–111.
25. Мур Дж.В., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах. – М.: Мир, 1987. – С. 175–195.

Поступила 12.02.2017 г.

Информация об авторах

Семенов Е.С., младший научный сотрудник Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.

Свистов П.Ф., кандидат географических наук, старший научный сотрудник Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.

Талаш А.С., заместитель начальника международного отдела Национального центра управления в кризисных ситуациях МЧС России.

UDC 551.510.04

CHEMICAL COMPOSITION OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION IN RUSSIAN SUBARCTIC

Elena S. Semenets¹,
elena573s@yandex.ru

Petr F. Svistov¹,
svistov.pf@gmail.com

Aleksandr S. Talash²,
aleksandr.talash@gmail.com

¹ Voeikov Main Geophysical Observatory,
7, Karbysheva street, Saint-Petersburg, 194021, Russia.

² National Crisis Management Center,
1, Vatutina street, Moscow, 109012, Russia.

The relevance of studying chemical composition of atmospheric precipitation is caused by the need to control migration and transformation of pollutants that define the surface load.

The aim of the work is to summarize the measurement results of the major and minor ions of precipitation chemical composition in the Russian Polar region in 2007–2015, including the results obtained in the cooperative program of the Arctic and Antarctic Research Institute and the Voeikov Main geophysical observatory at the ice station in 2007–2008.

The research methods: theoretical analysis, data comparison.

The results. The authors have observed the increased content of heavy metals in precipitation in the Central Arctic. The heavy metal content reached up to 12 % of sum of ions. The maximum acidity was pH=4.7. The received values of heavy metals concentration (except nickel) in the atmospheric precipitation of the ice station didn't exceed background concentrations.

The summary. The reasons of the increased content of heavy metals in the atmospheric precipitation remain almost uncertain. It is necessary to organize according to the special program regular observations of acidity and chemical composition of atmospheric precipitation on the water area of the Arctic Ocean. At the same time it is necessary to expand the list of the analyzed components in atmospheric precipitation, included heavy metals in it.

Key words:

Natural conditions, precipitation, chemical composition, acidity, environment, wet fallout, regional background.

REFERENCES

1. AMAP, 1998. *AMAP Assessment Report: Arctic pollution Issues. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP)*. Oslo, Norway, 1998. xii+859 p.
2. Dobrovolskiy V.V. *Osnovy biogeokhimii* [Fundamentals of biogeochemistry]. Moscow, Akademia Publ., 2003. 400 p.
3. Petrenchuk O.P. *Eksperimentalnye issledovaniya atmosfernogo aerolya* [Atmospheric aerosol experimental research]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1979. 264 p.
4. AMAP, 2005. *AMAP Assessment 2002: Heavy Metals in the Arctic*. Oslo, Norway, 2005. xii+265 p.
5. *Metodicheskoe pismo. Sostoyanie rabot po nablyudeniyu za khimicheskim sostavom i kislotnostyu atmosferykh osadkov v 2014 godu* [State management of chemical precipitations and atmospheric acidity in 2014]. St-Petersburg, 2015. 56 p.
6. AMAP, 2006. *AMAP Assessment 2006: Acidifying Pollutants, Arctic Haze, and Acidification in the Arctic. Arctic monitoring and Assessment Programme (AMAP)*. Oslo, Norway, 2006. xii+112 p.
7. *Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery RD 52.04.186–89* [Air pollution monitoring program]. Moscow, 1991. 696 p.
8. Svistov P.F., Talash A.S., Semenev E.S. O prostranstvenno-vremennyykh izmeneniyah kislotnosti atmosferykh osadkov. *Klimat i Priroda*, 2016, no. 2 (19), pp. 14–26.
9. Izrael Yu.A., Nazarov I.M., Pressman A.Ya. *Kislotnye dozhdii* [Acid rain]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989. 269 p.
10. *GAW Report No. 160. Manual for the GAW Precipitation Chemistry Programme*. WMO, 2004. xii+170 p.
11. Pershina N.A., Polishchuk A.I., Svistov P.F. K voprosy o zakislennii atmosferykh osadkov v Rossiyskoy Arktike [Acidification of atmospheric precipitation in the Russian Arctic]. *Tr. GGO*, 2008, Iss. 558, pp. 211–232.
12. *Diagnosticheskiy analiz sostoyaniya okryzhayushchey sredy Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii* [Diagnostic analysis of arctic environment state in the Russian Federation]. Ed. by B.A. Morgunov. Moscow, Naychny mir Publ., 2011. 124 p.
13. Ye H., Kalkstein L.S. The detection of climate change in the Arctic: an updated report. *Atmospheric research*, 1995, vol. 37, Iss. 1–3, pp. 163–173.
14. Prik Z.M. *Fiziko-geograficheskoe rayonirovanie Arktiki* [Arctic physiographic zonation]. Leningrad, Gidrometizdat Publ., 1967. P. 1, pp. 15–48.
15. *Fiziko-geograficheskaya kharakteristika Arkticheskoy zony Rossii* [Russian Arctic physiographic characteristics]. *Obzor Rosgidrometa*, 2011. Ch. 1, pp. 14–46.
16. Overland J.E. A difficult Arctic Science issue: Midlatitude weather linkages. *Polar Science*, 2016, vol. 10, Iss. 3, pp. 210–216.
17. AMAP, 2015. *AMAP Assessment 2015: Black carbon and ozone as Arctic climate forcers. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP)*. Oslo, Norway. vii+116 p.
18. *Arkhiv pogody v Noril'ske* [Norilsk weather records]. *World Weather.ru*. Available at: <http://world-weather.ru/archive/russia/norilsk> (accessed 25 August 2016).
19. Devasthale A., Will U., Karlsson K.-G., Jones C.G. Quantifying the clear-sky temperature inversion frequency and strength over the Arctic Ocean during summer and winter seasons from AIRS profiles. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 2010, vol. 10,

- pp. 2835–2858. URL: <http://www.atmos-chem-phys.net/10/5565/2010/acp-10-5565-2010.pdf> (accessed 25 August 2016).
20. Tomasi C., Kokhanovsky A.A. Aerosol remote sensing in polar regions. *Earth-Science Review*, 2015, vol. 140, pp. 108–157.
 21. Barrie L.A. Occurrence and trends of pollution in the Arctic troposphere. *NATO ASI Series*, 1996, vol. 143, pp. 93–129.
 22. Kotova E.I., Shevchenko V.P. Vliyanie dalnego atmosfernogo perenosa na formirovanie ionnogo sostava atmosferykh osadkov i snezhnogo pokrova pribrezhnoy zony zapadnogo sektora Rossiyskoy Arktiki [Influence of long-range transport to precipitation chemistry formation and snow cover of a coastal zone of the western sector of the Russian Arctic]. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2014, no. 12–11, pp. 2378–2382; Available at: <http://www.fundamental-research.ru/pdf/2014/12-11/36699.pdf> (accessed 10 October 2016).
 23. Maystrenko V.N., Khamitov R.Z., Budnikov G.K. *Ekologo-analitichesky monitoring supertoksikantov* [Environmental and analytical monitoring of supertoxicants]. Moscow, Khimiya Publ., 1996. 320 p.
 24. *Gidrokhimicheskie pokazateli sostoyaniya okruzhayushchey sredy. Spravochnye materialy* [Geochemical indices of environment state]. Ed. by T.V. Guseva. Moscow, FORUM–INFRA-M Publ., 2007. pp. 93–111.
 25. Mur Dzh.V., Ramamurti S. *Tyazhelye metally v prirodnykh vodakh* [Heavy metals in natural waters]. Moscow, Mir Publ., 1987. pp. 175–195.

Received: 12 February 2017.

Information about the authors

Elena S. Semenets, junior researcher, Voeikov Main Geophysical Observatory.

Petr F. Svistov, Cand. Sc., senior researcher, Voeikov Main Geophysical Observatory.

Aleksandr S. Talash, deputy director, National Crisis Management centre subdivisions.

УДК 550.837

ВОЗМОЖНОСТИ ГЕОРАДАРНОГО МЕТОДА ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ПОДПОРНЫХ СТЕН И ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Фоменко Николай Евгеньевич¹,
fnegeophyskohle@yandex.ru

Гапонов Дмитрий Александрович²,
geophysics@land.ru

Капустин Владимир Викторович³,
1391854@mail.ru

Попов Виктор Владимирович⁴,
viktor_popov_34@mail.ru

Фоменко Людмила Николаевна⁵,
detush@yandex.ru

¹ Южный федеральный университет,
Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 40.

² ОАО «Геострой-Ф»,
Россия, 344064, г. Ростов-на-Дону, ул. Днепроградская, 54.

³ ООО «НИИ Геотех»,
Россия, 110024, г. Москва, 2-ая ул. Энтузиастов, 5, стр. 39.

⁴ Южно-Российский политехнический университет,
Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

⁵ Донской государственный технический университет,
Россия, 344022, Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162.

Актуальность работы обусловлена необходимостью решения инженерно-геологической задачи по неразрушающему обследованию монолитности и технического состояния подпорных стен, сооруженных в потенциально оползнеопасных зонах, экспрессными геофизическими методами.

Цель работы: оценка информативности георадарного метода в инженерно-строительной области при обследовании вертикальной подпорной стены с последующей обработкой натурных наблюдений специализированными программами ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ и АТРАН. Подчеркнута ограниченная мобильность ультразвуковых и акустических методов, в которых при измерениях требуется плотный контакт передающих и приемных датчиков сейсмического поля с вертикальной поверхностью изучаемого объекта, что технически не позволяет выполнять регистрацию сигналов поля в движении.

Методы исследования: радиолокационная съёмка подпорной стены георадаром ОКО с антенным блоком 400 МГц посредством перемещения последнего по вертикальным профилям на специально смонтированных верёвочных лыжах с прижатием блока к стене с помощью деревянного шеста при регистрации и контроле радарограмм в режиме реального времени.

Результаты. Показаны возможности атрибутного анализа данных георадиолокации для изучения состояния подпорной стены на оползневом склоне правого берега р. Дон в г. Ростове-на-Дону с выявлением и оконтуриванием по значениям атрибута Q -factor зон относительно крепкой и относительно ослабленной кладки, а также местоположения металлических шпунтов (стальных труб) в теле лицевой и боковой стен. Интерпретация радарограмм выполнена на основе метода исследования осей синфазности дифрагированных волн и характерного «звона» в форме переотражений от точечных объектов. Дополнительно проведен анализ энергии отраженных сигналов в программе АТРАН. В результате исследований изучен контакт стены с грунтом, который можно считать относительно равномерно плотным, причём для боковой стены нижняя область более плотная, чем верхняя, а для лицевой стены наблюдается менее плотный контакт в диапазоне 20–25 метров от левого края стены.

Ключевые слова:

Геофизические методы неразрушающего контроля в строительстве, радарограммы, анализ динамических характеристик волнового поля, подпорная стена, потенциально оползневой объект.

Введение

Комплекс методов неразрушающего контроля, включающий ультразвуковые, акустические и георадарные методы, в настоящее время широко применяется при диагностике крупных железобетонных строительных конструкций. К ним отно-

сятся фундаментные плиты, перекрытия, сваи, ограждающие конструкции котлованов, подпорные стены, стены шлюзов, устои мостов и тому подобное. При правильном выборе комплекса может быть произведена оценка прочности, сплошности, толщины, контактных условий конструкций с

вещающим грунтом, наличия внешних и внутренних дефектов [1–16]. Используется портативная высокоразрешающая аппаратура. Учитывается: а) преимущественная роль ультразвуковых и акустических методов за счет возможности оценки прочностных характеристик материала посредством корреляционных зависимостей; б) селективность ультразвуковых методов (диапазон частот от 20 до 100 кГц), позволяющая исследовать только поверхностную часть бетонных конструкций; в) повышенная глубинность акустических методов (диапазон частот от 0,5 до 20 кГц) при понижении разрешающей способности по сравнению с ультразвуковым методом; г) ограниченная мобильность ультразвуковых и акустических методов по сравнению с георадарным, поскольку требуется плотный контакт передающих и приемных датчиков сейсмоволнового поля с поверхностью изучаемого объекта, что технически не позволяет выполнять регистрацию сигналов поля в движении [17–19]. По этим причинам визуальное и акустическое обследование бетонных конструкций производится, как правило, только с верхней (торцевой) поверхности и позволяет определить лишь интегральные характеристики объекта исследования, причем даже в тех случаях, когда этот объект частично вскрыт котлованом (рис. 1).

Детальное обследование лицевых поверхностей вертикальных бетонных и каменных конструкций технически более доступно посредством георадарного профилирования [20]. Это подтверждается результатами радиолокационных исследований подпорной стены на оползневом склоне правого берега

реки Дон в г. Ростове-на-Дону на строительной площадке «Административно-жилого здания РО-ТЭПа».

Цель работ состояла в решении инженерно-технической задачи по обследованию монолитности стены с выделением в её конструкции ослабленных зон и изучения состояния прилегания (границы нагрузки) с потенциально оползнеопасной грунтовой толщей.



Рис. 2. Общий вид подпорной стены со стороны ул. Береговой в г. Ростове-на-Дону

Fig. 2. General view of the supporting wall from the side of Beregovaya Street in Rostov-on-Don

Фотопанорама подпорной стены показана на рис. 2. Необходимость в её обследовании обусловлена «забутованностью» дренажных отверстий

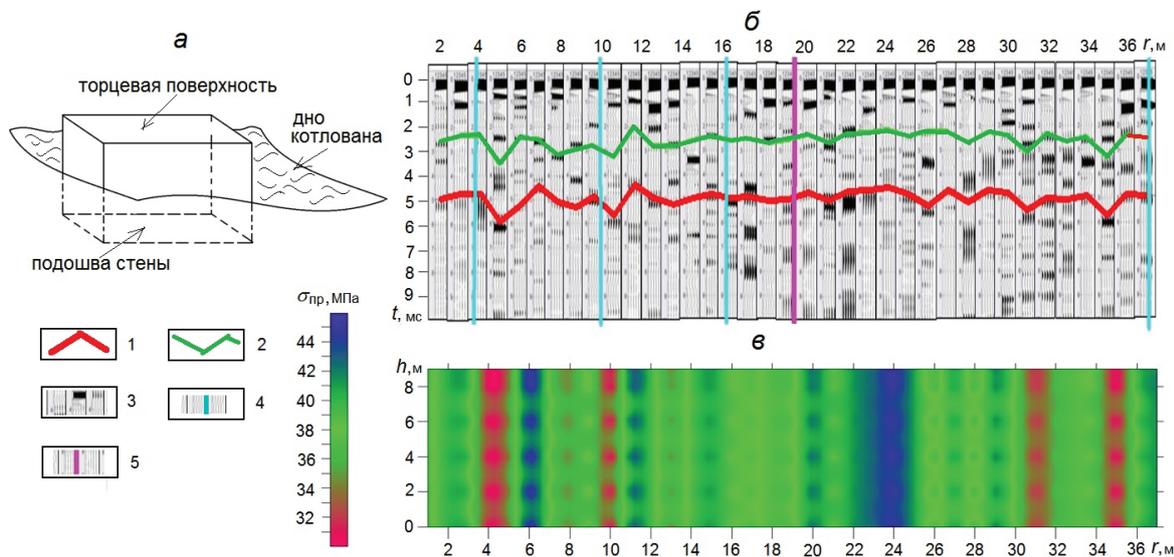


Рис. 1. Макет натурной бетонной стены частично вскрытой котлованом (а) с отображением (метод t_D) акустического поля (б) и распределением областей различной интегральной прочности (в). 1, 2 – кривые первых вступлений от подошвы стены в грунт и дна котлована вскрытия; 3 – отражения от локальных дефектов в бетоне; 4 – места проявления трещин; 5 – деформационный шов

Fig. 1. Layout of the full-scale concrete wall partially opened by the ditch (a) with displaying (method t_D) acoustic field (b) and distribution of the areas of the different integral solidity (в). 1, 2 are the graphs of first entrances from the bottom of the wall into the ground and two ditches of opening; 3 are the reflections from local defects in concrete; 4 are the locations of cracks appearance; 5 is the dilatation joint

основания, частичным разрушением воздуховода и обсыпанием облицовочного камня из плитчатого песчаника.

Методика работ

Радиолокационная съёмка производилась георадаром ОКО с антенным блоком 400 МГц. Использовался непрерывный способ перемещения последнего по вертикальным профилям с записью и одновременным представлением информации в форме радарограмм на дисплее ноутбука. Для строгого перемещения антенного блока по вертикальной стене по заданным профилям была применена технология «верёвочных лыж» с одновременным прижатием блока к стене с помощью деревянного шеста. Конструктивно верёвочные лыжи состояли из двух пластиковых труб, закрепленных на боковых торцах антенного блока (рис. 3).

Через трубы пропускались два капроновых шнура, закреплявшихся в основании и на верхней торцевой поверхности стены с помощью металлических швеллеров весом порядка 20 кг, которые последовательно перемещались по размеченным пикетам с шагом 5 м. Увязка профилей осуществлялась по верхней кромке стены. На ней также с помощью ноутбука производилась в режиме реального времени регистрация радарограмм. Выбор интервала наблюдений определялся пространственной разрешающей способностью (минимальное расстояние по горизонтали, на котором могут быть различимы два отражающих объекта или их детали). Развертка по глубине составляла 50 нс; накопление сигналов – 12 единиц; шаг зондирования – 50 мм.

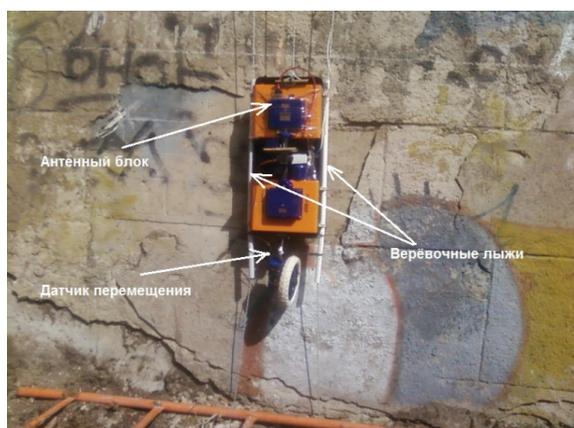


Рис. 3. Технология георадиолокационной съёмки по вертикальной стене

Fig. 3. Technology of the ground penetrating radar survey along a vertical wall

Обработка данных радиолокационной съёмки основывалась на анализе динамических характеристик волнового поля. Полевой материал обрабатывался при помощи программ автоматизированной обработки георадиолокационных данных ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ (ISSN 1681–4568) [21, 22] и ATRAN (блок атрибутивного анализа, приложение к

GeoScan-32). Алгоритмы, положенные в основу данных программ, позволяют построить приближённую модель среды в параметрах скорости электромагнитной волны или диэлектрической проницаемости либо другого атрибута волнового поля. Сущность алгоритма программы ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ состоит в формировании набора точек, имеющих координаты и атрибуты в виде значений знаковых показателей (скорости, частоты и др.). Далее происходит отбраковка точек по скоростному критерию. То есть точки со значениями, превышающими скорости электромагнитной волны в вакууме, и точки с таковыми ниже минимальной скорости распространения электромагнитной волны в воде, не принимаются к рассмотрению в качестве опорных и удаляются. В оставшемся поле точек для выделения разуплотнённых и трещиноватых зон в стене производится анализ изменений атрибута волнового поля «Q-factor» (отношение ширины спектра сигнала к его центральной частоте) либо другого атрибута волнового поля. В результате строятся разрезы выбранного атрибута в 3D сборке. Относительно разуплотнённые и механически ослабленные зоны выделяются по признаку повышенных значений атрибута ϵ' (действительной части комплексной относительной диэлектрической проницаемости) [21, 22].

Результаты исследований

Результаты исследования прочности кладки представлены на рис. 4. Показаны сечения 3D сборки по лицевой (а) и боковой (б) стенам. Атрибут Q-factor характеризует электромагнитные потери в среде и корреляционно связан с прочностью кладки. Низкие значения атрибута Q-factor с интервалом значений 3,1–3,4 соответствуют относительно крепкой кладке, а места со значениями атрибута 3,7–3,9 – наиболее ослабленным зонам.

Сечения 3D сборки по линии контакта лицевой и боковой стенок с грунтовой толщей береговой зоны реки Дон приведены на рис. 5, а, б. Наблюдается поле небольшого разброса значений атрибута Q-factor в пределах полутора единиц. Следует вывод, что контакт стены с грунтом можно считать относительно равномерно плотным, причём для боковой стены нижняя область более плотная, чем верхняя, а для лицевой стены наблюдается менее плотный контакт в диапазоне 20–25 м от левого края стены. Подобный результат также может быть получен при анализе энергии или амплитуды отраженного сигнала в программе ATRAN от плоскости контакта подпорной стены с грунтом (рис. 6).

Задача по выявлению наличия металлических шпунтов в теле стены решалась посредством анализа радарограмм, полученных по данным РЛЗ на горизонтальном профиле, который был размечен на лицевой и боковой стенках на высоте $\approx 1,5$ м от дневной поверхности. Для определения положения металлических шпунтов могут быть использованы различные способы атрибутивного анализа ра-

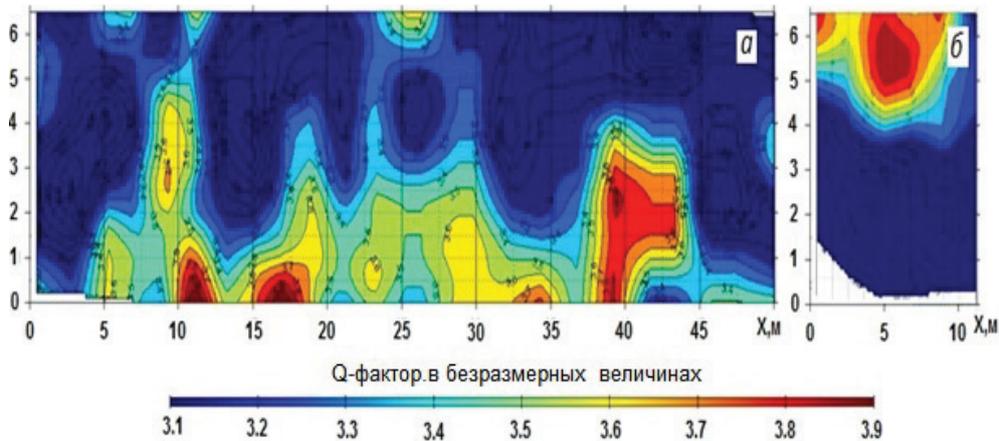


Рис. 4. Сечение 3D сборки по лицевой и боковой стенкам

Fig. 4. Cross-section of 3D assembly along the front and side walls

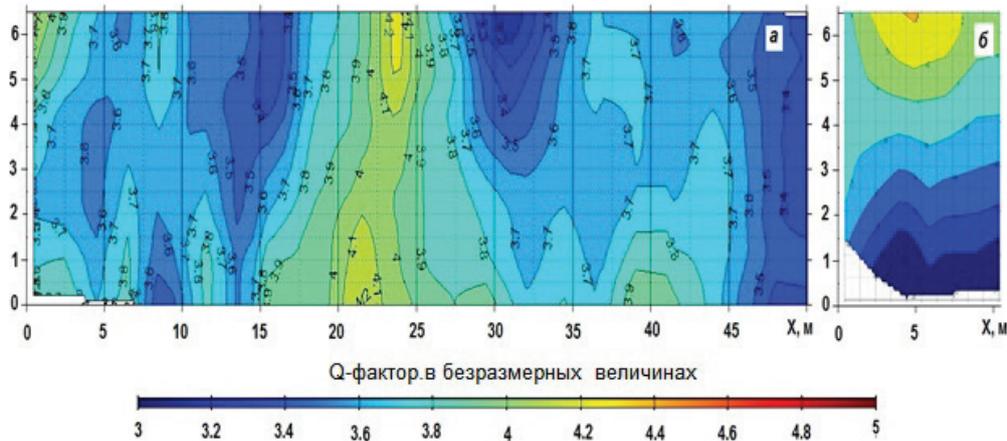


Рис. 5. Сечение 3D сборки по линии контакта лицевой и боковой стенок с грунтовой толщей береговой зоны реки Дон

Fig. 5. Cross-section of 3D assembly along the contact line of the front and side walls with ground thickness of the Don River side area

дарограмм. К примеру хороший результат дает амплитудный анализ отраженного сигнала или величина энергии сигнала во временном окне, который может быть получен с помощью программы АТ-RAN (рис. 7).

Радарограммы и карт-графы обработки (амплитудные разрезы), полученные по модели ПОИСК в программе ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ, приведены на рис. 8.

Интерпретация радарограмм выполнена на основе метода исследования осей синфазности дифрагированных волн и характерного «звона» в форме преотражений от точечных объектов [23]. На амплитудных разрезах маркерами показано положение отражений, которые с высокой вероятностью могут соответствовать металлическим вертикально ориентированным трубам. Определяемый шаг между трубами на лицевой и боковой стенках составляет более трёх метров. Не исключено, что в процессе строительства стены могли быть отступления от проектных решений, например осуществлена замена металлических труб свайными железобетонными столбами, которые по электромагнитным и прочностным свойствам не отличаются от материала стены.

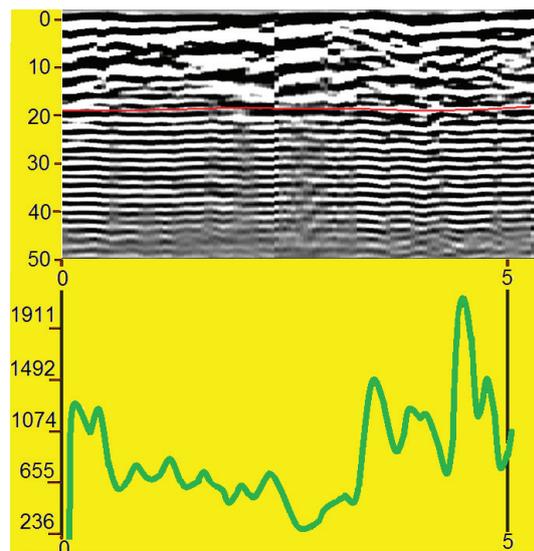


Рис. 6. График энергии отраженного сигнала от поверхности контакта для профиля, проходящего по центру боковой стены

Fig. 6. Graph of the energy of the reflected signal from contact surface for profile in the centre of the side wall

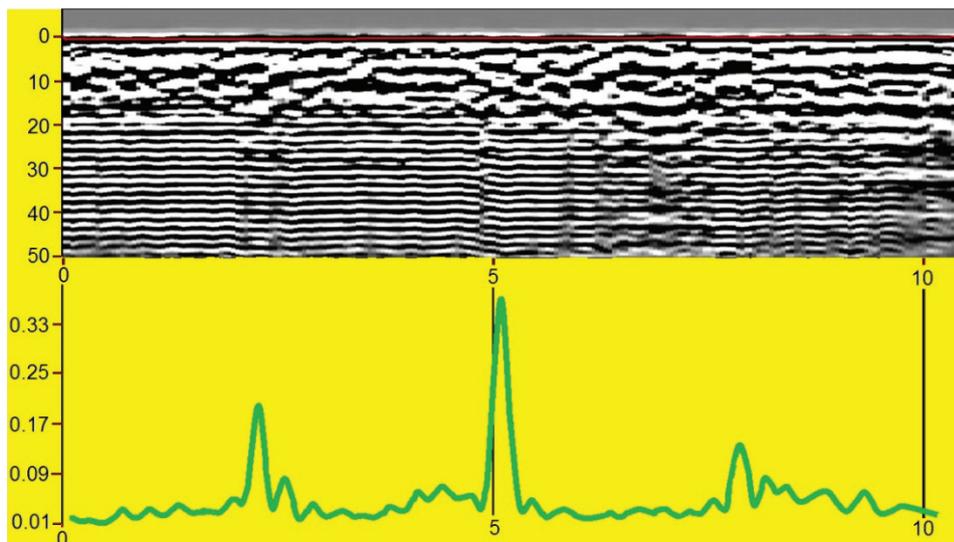


Рис. 7. График энергии отраженного сигнала по горизонтальному профилю на боковой стене. Максимумы графика энергии соответствуют положению шпунтов

Fig. 7. Graph of energy of the reflected signal along the horizontal profile on the side wall. Maximums of the energy graph correspond to dowels location

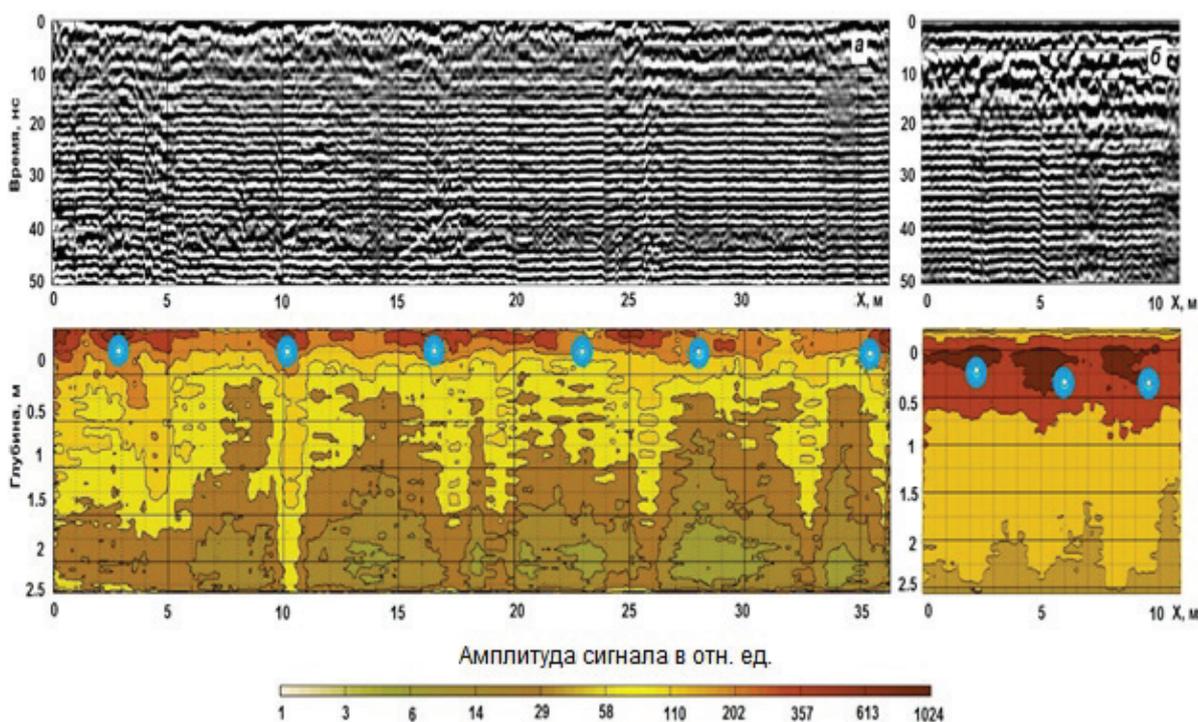


Рис. 8. Радарограмма и амплитудный разрез по горизонтальному профилю на лицевой (а) и боковой (б) стенках

Fig. 8. Radargram and amplitude of the cross-section over the horizontal profile of the front (a) and side (b) walls

Обсуждение результатов

Результаты проведенных авторами исследований сводятся к апробации и внедрению современной технологии георадиолокации для решения инженерно-геологических и инженерно-технических задач при обследовании и мониторинговых наблюдениях бетонных конструкций. Как показывает аналитический обзор, решение этих задач с помощью методов неразрушающего контроля

(преимущественно геофизических, основанных на использовании сейсмоакустических, электромагнитных и тепловых полей) было и остается перманентно актуальной проблемой.

Спецификой проведенных работ являлась постановка инженерной задачи по обследованию вертикальной бетонной стены на оползневом объекте в районе нового строительства, где на набережной р. Дон по проекту сооружалось 23-х этажное зда-

ние. Соответственно, необходимость в проведении обследования состояния этой стены, как решения инженерно-технической задачи, преимущественно вытекала и имела определенную экологическую значимость на предмет устойчивости стены воздействию оползня на строящийся строительный объект с его последующей эксплуатацией.

Во введении указывалось, что от существующего комплекса геофизических методов обследования бетонных конструкций георадарный отличается, прежде всего, мобильностью. По этому показателю другие методы не могут составить конкуренции георадарному при обследовании вертикальных и крутонаклонных бетонных сооружений по причине точечного опробования. Преимущество современной технологии георадиолокации при выявлении дефектов бетонных конструкций заключается и в создании новых программных продуктов обработки радарограмм, что позволяет наряду с анализом первичной волновой картины производить ее математическую фильтрацию посредством построения приближенной модели (моделей) среды в параметрах электромагнитного поля и тем самым высветить значимые объекты на фоне помех. Недостатком георадиолокационных измерений, в отличие от ультразвуковых и сейсмоакустических, является отсутствие на настоящий момент количественных корреляционных зависимостей, позволяющих оценивать физико-механические свойства бетона.

Перспективы совершенствования ультразвуковых и акустических методов видятся в разработке технологий непрерывной записи параметров поля в движении посредством использования специальных подошвенных гидравлических подушек. Другим направлением совершенствования используемых геофизических методов неразрушающего контроля бетонных и других твердотельных конструкций может явиться разработка малогабаритных многочастотных ультразвуковых, акустических, и георадарных приборов, содержащих два и более разноудаленных от генератора приемных блока.

Выводы

- Произведена апробация и внедрение современной технологии георадиолокации для решения инженерно-технической задачи в процессе проектных и строительных работ на примере изучения состояния вертикальной подпорной стены

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 31937–2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М.: Стандартинформ, 2014. – 86 с.
2. ГОСТ Р 53778–2010. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М.: Стандартинформ, 2010. – 90 с.
3. Рекомендации по проведению георадиолокационных измерений для решения геологических задач. – Раменское: ООО «Логические системы», 2005. – 49 с.

ны на оползневом склоне правого берега р. Дон в г. Ростове-на-Дону. Результатом явилось выявление и оконтуривание по значениям атрибута Q-factor зоны относительно крепкой и относительно ослабленной кладки стены. Установлено, что: а) контакт стены с грунтом можно считать относительно равномерно плотным, причём для боковой стены нижняя область более плотная, чем верхняя, а для лицевой стены наблюдается менее плотный контакт в диапазоне 20–25 метров от левого края стены; б) бетонная стена сооружена на свайном основании из металлических шпунтов (стальных труб) при том, что по лицевой стене шаг между трубами превышает проектный в два раза, предположительно по причине изменений проектных решений в процессе строительства стены, например заменой металлических труб свайными железобетонными столбами, которые по электромагнитным и прочностным свойствам не отличаются от материала стены.

- Преимущество современной технологии георадиолокации при выявлении дефектов бетонных конструкций заключается в мобильности натурных наблюдений и в создании новых программных продуктов обработки радарограмм, что позволяет наряду с анализом первичной волновой картины производить ее математическую фильтрацию посредством построения приближенной модели (моделей) среды в параметрах электромагнитного поля и тем самым высветить значимые объекты на фоне помех. Недостатком георадиолокационных измерений, в отличие от ультразвуковых и сейсмоакустических, является отсутствие на настоящий момент количественных корреляционных зависимостей, позволяющих оценивать физико-механические свойства бетона.
- Актуальной задачей совершенствования методов неразрушающего контроля вертикальных бетонных сооружений является разработка: а) технологий непрерывной записи параметров поля в движении посредством использования специальных подошвенных гидравлических подушек в ультразвуковых и акустических приборах; б) малогабаритных многочастотных ультразвуковых, акустических и георадарных аппаратных комплексов, содержащих два и более разноудаленных от генератора приемных блока.

4. СП 13–102–2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. – М.: Стандартинформ, 2004. – 43 с.
5. Бауков А.Ю. Опыт комплексного применения геофизических методов неразрушающего контроля при обследовании подземных объектов и памятников культуры г. Москвы // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2005. – № 7. – С. 87–91.
6. Кириленко А.М., Знайченко П.А., Бауков А.Ю. Методы инженерной геофизики при решении специализированных задач

- исследования строительных конструкций: проблемы и достижения. URL: <http://znayugeo.ru/wp-content/uploads/2016/03/inj-geo2006.pdf> (дата обращения 15.02.2017).
7. Шилин А.А., Кириленко А.М., Знайченко П.А. Обследование подземной части зданий, сооруженных с помощью «стены в грунте» // Строительная геотехнология: сборник статей. Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). – М.: Изд-во «Горная книга», 2010. – С. 349–356.
 8. Kirilenko A., Znaychenko P., Kapustin V. Integrated Solutions in Structural Diagnostics // Structural Faults + Repair 2010: Proc. of the Int. Conf. – Edinburgh, UK, 2010. – P. 12–16.
 9. Клевко В.И. Обслуживание и испытание зданий и сооружений. Обследование строительных конструкций. – Пермь: Изд-во Пермского нац. исслед. политех. ун-та, 2014. – 164 с.
 10. Carpinteri A., Xu J., Lacidogna G. Reliable onset time determination and source location of acoustic emissions in concrete structures // Cement and Concrete Composites. – 2012. – V. 35. – P. 529–537.
 11. Multimodal analysis of GRC ageing process using nonlinear impact resonance acoustic spectroscopy / V. Genove, C. Riestra, M.V. Borrachero, J. Eiras, T. Kundu, J. Paya // Composites. P. B: Engineering. – 2015. – V. 21. – P. 105–111.
 12. Effect of the presence and size of a real macro-crack on diffuse ultrasound in concrete / A. Quiviger, C. Payan, J.F. Chaix, V. Garnier, J. Salin // NDT&E International. – 2012. – V. 45. – P. 128–132.
 13. Nondestructive evaluation of forced delamination in glass fiber-reinforced composites by terahertz and ultrasonic waves / J. Dong, B. Kim, A. Locquet, P. McKeon // Composites. – 2015. – V. 24. – P. 667–675.
 14. Yue Li, Chun-e Sui, Qing-jun Ding. Study on the Cracking Process of Cement-Based Materials by AC Impedance Method and Ultrasonic Method // Journal of Nondestructive Evaluation. – 2012. – V. 15. – P. 83–90.
 15. Evaluation of Concrete Distributed Cracks by Ultrasonic Travel Time Shift under an External Mechanical Perturbation: Study of Indirect and Semidirect Transmission Configurations / D. Bui, S.A. Kodjo, P. Rivard, B. Fournier // Journal of Nondestructive Evaluation. – 2012. – V. 37. – P. 100–107.
 16. Fursa T.V., Petrov M.V., Korzenok I.N. Influence of cyclic freeze-thaw on the parameters of the electric response to the pulse mechanical excitation of concrete reinforced by glass fiber reinforced polymer bars // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 110. – 2016. – 012088.
 17. Marfurt K.J., Kirilin S.L., Farmer M.S. 3D seismic attributes using a semblance-based coherence algorithm // Geophysics. – 1998. – № 4. – P. 1150–1165.
 18. Klein P., Richard L., Yames H. 3D curvature attributes: a new approach for seismic interpretation // First Break. – 2008. – № 4. – P. 105–111.
 19. Капустин В.В., Кувалдин А.В. Применение комплекса геофизических методов при исследовании фундаментных плит // Технологии сейсморазведки. – 2015. – № 1. – С. 99–105.
 20. Капустин В.В., Хмельницкий А.Ю., Бакайкин Д.В. О возможности использования неоднородных электромагнитных волн для исследования фундаментных конструкций // Вестник Московского университета, Сер. Геология. – 2011. – № 1. – С. 52–55.
 21. Денисов Р.Р., Капустин В.В. Обработка георадарных данных в автоматическом режиме // Геофизика. – 2010. – № 4. – С. 76–80.
 22. Гапонов Д.А., Фоменко Л.Н., Шеремет Р.Д. Применение георадара для контроля качества закрепления грунтов // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 3. URL: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_48_Gaponov.doc..pdf_e245227f15.pdf (дата обращения 15.02.2017).
 23. Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных. – М.: Изд-во МГУ, 2008. – 192 с.

Поступила 17.02.2017 г.

Информация об авторах

Фоменко Н.Е., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоэкологии и прикладной геохимии Института наук о земле Южного федерального университета.

Гапонов Д.А., кандидат геолого-минералогических наук, инженер-геофизик ОАО «Геострой-Ф».

Капустин В.В., кандидат физико-математических наук, технический директор ООО «НИИ Геотех».

Попов В.В., доктор технических наук, профессор кафедры нефтегазовой техники и технологии Факультета геологии, горного и нефтегазового дела Южно-Российского политехнического университета.

Фоменко Л.Н., кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной информатики и вычислительной техники Академии строительства и архитектуры Донского государственного технического университета.

UDK 550.837

OPPORTUNITIES OF GROUND PENETRATING RADAR AT SEARCHING SUPPORTING WALLS AND ENCLOSING CONSTRUCTIONS

Nikolay E. Fomenko¹,
fnegeophyskohle@yandex.ru

Dmitriy A. Gaponov²,
geophysics@land.ru

Vladimir V. Kapustin³,
1391854@mail.ru

Viktor V. Popov⁴,
viktor_popov_34@mail.ru

Ludmila N. Fomenko⁵,
detush@yandex.ru

¹ Southern Federal University,
40, Zorge street, Rostov-on-Don, 344090, Russia.

² Geostroy-F,
54, Dneprogradskaya street, Rostov-on-Don, 344064, Russia.

³ NII Geotech Ltd,
5, Second Street of Entuziastov, Moscow, 110024, Russia.

⁴ South Russian Polytechnic University,
132, Prosveshcheniya street, Novocherkassk, 346428, Russia.

⁵ Don State Technical University,
162, Sotsialisticheskaya street, Rostov-on-Don, 344022, Russia.

Relevance of the research is caused by the necessity to solve engineering geological tasks in non-destructive investigation of solidity and technical conditions of supporting walls, erected in potentially landslide dangerous areas, by express geophysical methods.

The aim of the research is to estimate the informational content of the ground penetrating radar method in engineering and construction area at survey of vertical supporting wall with following processing of field observations by specialized programmes GEORADAR-ECSPERT and ATRAN. The paper highlights the limited mobility of the ultrasound and acoustic methods in which the intimate contact of transmitting and receiving sensors of seismic wave field with vertical surface of the studied object is required when measuring. This does not technically allow recording field signal in motion.

Methods of the study: ground penetrating radar survey of supporting wall by radar OKO with 400 MGz antenna unit by means of moving the latter along vertical profiles on specially installed rope skis pressing the unit to the wall with help of the wooden pole at registration and control of radargram in online mode.

Results. The paper demonstrates the opportunities of the attributive analysis of the ground penetrating radar survey data for studying the conditions of supporting wall on landslide slope of the right bank of the Don river in Rostov-on-Don with detection and contouring by the Q-factor attribute values the areas with relatively solid and relatively weak masonry and location of metal dowels (steel pipes) into the front and side walls body. The diagrams were interpreted on the base of the diffracted wave pattern studying method and distinctive «ringing» in the shape of re-reflections from dotted objects. Additionally the authors have analysed the reflected signals energy in the program ATRAN. The contact of the wall with ground was explored. It is evenly dense. For the side wall the lower part is denser than the upper one, and for the front wall the less dense contact into range of 20–25 m from the left edge of the wall is observed.

Key words:

Geophysical methods of non-destructive control in construction, radargram, analysis of dynamic characteristics of wave field, supporting wall, potentially landslide object.

REFERENCES

1. GOST 31937–2011. Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya [State Standard 31937–2011. Buildings and constructions. Rules of the inspection and monitoring of the technical condition]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 86 p.
2. GOST R 53778–2010. Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya [State Standard 53778–2010. Buildings and constructions. Rules of the inspection and monitoring of the technical condition]. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 90 p.
3. Rekomendatsii po provedeniyu georadiolokatsionnykh izmereniy dlya resheniya geologicheskikh zadach [Recommendations for conducting ground penetrating radar measurements for resolving geological tasks]. Ramenskoe, Logicheskie sistemy Publ., 2005. 49 p.

4. SP 13–102–2003. *Pravila obsledovaniya nesushchikh stroitelnykh konstruksiy zdany i sooruzheny* [SP 13–102–2003. Rules of inspection of bearing building constructions of buildings and structures]. Moscow, Standartinform Publ., 2004. 43 p.
5. Baukov A.Yu. Experience in complex application of geophysical methods of non-destructive control when inspecting underground objects and monuments of culture in Moscow. *Gornyye informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2005, no. 7, pp. 87–91. In Rus.
6. Kirilenko A.M., Znaychenko P.A., Baukov A.Yu. *Metody inzhenernoy geofiziki pri reshenii spetsializirovannykh zadach issledovaniya stroitelnykh konstruksiy: problemy i dostizheniya* [Methods of engineering geophysics in solving specialized tasks of studies of building structures: problems and achievements]. Available at: <http://znayugeo.ru/wp-content/uploads/2016/03/inj-geo2006.pdf> (accessed 15 February 2017).
7. Shilin A.A., Kirilenko A.M., Znaychenko P.A. *Obsledovanie podzemnoy chasti zdany, sooruzhennykh s pomoshchyu «steny v grunte»* [Survey of underground parts of buildings erected using the «diaphragm wall»]. *Stroitel'naya geotekhnologiya: sbornik statey. Otdelnyy vypusk Gornogo informatsionno-analiticheskogo byulletenya (nauchno-tekhnicheskogo zhurnala)*. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2010. pp. 349–356.
8. Kirilenko A., Znaychenko P., Kapustin V. *Integrated Solutions in Structural Diagnostics. Proceedings of the Int. Conf. Structural Faults + Repair 2010*. Edinburgh, UK, 2010. Pp. 12–16.
9. Kleveko V.I. *Obsluzhivanie i ispytanie zdany i sooruzheny. Obsledovanie stroitelnykh konstruksiy* [Maintenance and testing buildings and structures. Examination of building structures]. Perm, Perm National Research Polytechnic University Press, 2014. 164 p.
10. Carpinteri A., Xu J., Lacidogna G. Reliable onset time determination and source location of acoustic emissions in concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, 2012, vol. 35, pp. 529–537.
11. Genove V., Riestra C., Borrachero M.V., Eiras J., Kundu T., Paya J. Multimodal analysis of GRC ageing process using nonlinear impact resonance acoustic spectroscopy. *Composites. P. B: Engineering*, 2015, vol. 21, pp. 105–111.
12. Quiviger A., Payan C., Chaix J.F., Garnier V., Salin J. Effect of the presence and size of a real macro-crack on diffuse ultrasound in concrete. *NDT&E International*, 2012, vol. 45, pp. 128–132.
13. Dong J., Kim B., Locquet A., McKeon P. Nondestructive evaluation of forced delamination in glass fiberreinforced composites by terahertz and ultrasonic waves. *Composites. P. B: Engineering*, 2015, vol. 24, pp. 667–675.
14. Yue Li, Chun-e Sui, Qing-jun Ding Study on the Cracking Process of Cement-Based Materials by AC Impedance Method and Ultrasonic Method. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2012, vol. 15, pp. 83–90.
15. Bui D., Kodjo S.A., Rivard P., Fournier B. Evaluation of Concrete Distributed Cracks by Ultrasonic Travel Time Shift under an External Mechanical Perturbation: Study of Indirect and Semi-direct Transmission Configurations. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2012, vol. 37, pp. 100–107.
16. Fursa T.V., Petrov M.V., Korzenok I.N. Influence of cyclic freeze-thaw on the parameters of the electric response to the pulse mechanical excitation of concrete reinforced by glass fiber reinforced polymer bars. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 110*, 2016, 012088.
17. Marfurt K.J., Kirin S.L., Farmer M.S. 3D seismic attributes using a semblance-based coherence algorithm. *Geophysics*, 1998, no. 4, pp. 1150–1165.
18. Klein P., Richard L., Yames H. 3D curvature attributes: a new approach for seismic interpretation. *First Break*, 2008, no. 4, pp. 105–111.
19. Kapustin V.V., Kuvaldin A.V. Application of complex of geophysical methods in studying foundation slabs. *Tekhnologii seymorazvedki*, 2015, no. 1, pp. 99–105. In Rus.
20. Kapustin V.V., Khmelniisky A.Yu., Bakaykin D.V. On the possibility of using non-uniform electromagnetic waves for studying foundation structures. *Vestnik Moskovskogo universiteta, Ser. Geologiya*, 2011, no. 1, pp. 52–55. In Rus.
21. Denisov R.R., Kapustin V.V. Processing georadar data in automatic mode. *Geofizika*, 2010, no. 4, pp. 76–80. In Rus.
22. Gaponov D.A., Fomenko L.N., Sheremet R.D. Application of GPR for control of grouting quality. *Inzhenernyy vestnik Dona*, 2016, no. 3. In Rus. Available at: [khttp://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_48_Gaponov.doc.pdf_e245227f15.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_48_Gaponov.doc.pdf_e245227f15.pdf) (accessed 15 February 2017).
23. Starovoytov A.V. *Interpretatsiya georadiolokatsionnykh dannykh* [Interpretation of ground penetrating radar data]. Moscow, MGU Press, 2008. 192 p.

Received: 17 February.

Information about the authors

Nikolay E. Fomenko, Dr. Sc., professor, Southern Federal University.

Dmitriy A. Gaponov, Cand. Sc., engineer-geophysicist, Geostroy-F.

Vladimir V. Kapustin, Cand. Sc., technical director, NII Geotech Ltd.

Viktor V. Popov, Dr. Sc., professor, South Russian Polytechnic University.

Lyudmila N. Fomenko, Cand. Sc., associate professor, Don State Technical University.

УДК 004.932.2

МЕТОДИКА АВТОМАТИЧЕСКОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ КОМПОНЕНТ ОБЪЕКТОВ ЗАХОРОНЕНИЯ ОТХОДОВ ПО КОСМИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Казарян Маретта Леоновна¹,
marettak@bk.ru

Рихтер Андрей Александрович²,
urfin17@yandex.ru

Шахраманьян Михаил Андраникович^{1,2},
7283963@mail.ru

¹ Владикавказский филиал Финансового университета при Правительстве Российской Федерации, Россия, 362001, Владикавказ, ул. Молодежная, 7.

² НИИ АЭРОКОСМОС, Россия, 105064, г. Москва, Гороховский пер., 4.

Предлагается методика автоматического выделения компонент объектов захоронения отходов и разложения поверхности объекта на компоненты по космическим изображениям. Методика позволяет построить модели поверхности структурных объектов, таких как полигоны твердых бытовых отходов и муниципальных свалок, составленных из нескольких компонент, заданных разными текстурами поверхности. Применяются матрицы информационных признаков, идентифицирующие тот или иной компонент, дана их математическая модель и различные формы представления. Представлены понятия изображений компонент поверхности и общие компонентные изображения, на которых детально отражаются области детектирования, соответствующие разным текстурам поверхности. Описан критерий принадлежности пикселя изображения к тому или иному компоненту, каждый из которых характеризуется своей матрицей информационных признаков. Отмечена возможность обработки территорий поверхности Земли любого размера и автоматизации обработки.

Цель: разработать методику автоматического детектирования компонент объектов захоронения отходов по космическим изображениям.

Методы исследования: методы регрессионного анализа, методы математической статистики и обработки космических изображений.

Результаты. Представлены результаты методики на примере полигона твердых бытовых отходов Кучино (поселок Салтыковска, Балашихинский район Московского региона). Приведено представление в проекциях пространства информационных признаков значений яркости эталонной области покрытия заданной текстуры. Показан пример компонентного разложения фрагмента участка складирования отходов полигона: изображения ряда компонент и общее компонентное изображение. Построено компонентное разложение всего участка складирования: дифференцирование исходного видимого изображения WorldView2 покрытия свалки на небольшие участки, компонентное разложение каждого участка и интегрирование участков.

Ключевые слова:

Космическое изображение, объект захоронения отходов, свалка, текстура, матрица информационных признаков, компонент, детектирование, выделение, компоненты поверхности, модель поверхности, компонентная модель, компонентное разложение.

Введение

Существует множество методик детектирования объектов захоронения отходов (ОЗО) по космическим изображениям. Так, методика индексов реакции растительности работает со снимками низкого пространственного разрешения (в частности, Landsat 4–8). Для детектирования ОЗО требуется временная серия изображений, которые получают геопривязкой и разложением больших изображений на участки (постоянных или переменных размеров) [1]. Визуальная методика (по видимым аэрокосмическим, наземным изображениям) считается наиболее точным, но для этого область наблюдения сканируется в ручном режиме, просмотром, прослеживанием территории. Однако в связи с «ручным» характером методики ее эффективность уменьшается с ростом размера области наблюдения [2]. Методика эталона позволяет детектировать следы (признаки наличия) ОЗО на базе

одного изображения, что оказывается эффективнее для снимков низкого пространственного разрешения (особенно крупных), хотя может быть применима и для высокого. В методике используется точное совпадение коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) пикселей снимков на всех каналах по эталонным значениям, взятым с известных ОЗО на снимке [3].

Постановка задачи

Одна из задач космического мониторинга ОЗО [4–8] является их детектирование по снимкам из космоса. Среди методик автоматического детектирования свалок по аэрокосмическим снимкам [9–12] рассмотрим методику, позволяющую автоматически выделить компоненты ОЗО – области замусоривания, отличающиеся текстурой поверхности на космическом изображении среднего или высокого пространственного разрешения. Для это-

го используются специальные матрицы информационных признаков (МИП).

Для выделения ОЗО и его компонент на изображениях (независимо от разрешения в пределах 0–30 м) требуется критерий детектирования, близкий к зрительному восприятию компонент объектов человеком. МИП [13–16] – критерий детектирования компонент объекта (ОЗО), выраженный упорядоченным набором чисел, позволяющим по определенному алгоритму дешифровать на изображении те или иные признаки. Каждая компонента задается своей МИП.

Методика детектирования по визуальным признакам позволяет обнаружить ОЗО размеров, не меньше пространственного разрешения, за счет визуального прослеживания изображений поверхности земли. Визуальное детектирование можно проводить в специальной программе Google Earth, содержащей модель поверхности планеты Земля, построенную на разных участках в различном пространственном и временном разрешении.

Методика детектирования по эталонным значениям яркостей позволяет обнаружить следы замусоривания по значениям яркостей известных (эталонных) ОЗО. Для этого по мультиспектральному изображению строится характеристическое изображение, значениям элементов которого ставится взаимно однозначное соответствие с вектором значений яркостями пикселя на каналах исходного изображения.

Методика детектирования по индексам реакции растительности позволяет обнаружить и выделить ОЗО по снимкам среднего разрешения и построить временную серию выделений замусоривания. Для этого рассчитывается изображение индексов реакции растительности по синему, красному и ближнему инфракрасному каналам мультиспектральных изображений, после чего вычисляется изображение степени деградации почвы по временной серии полученных изображений, которое подвергается пороговой фильтрации.

В отличие от этих методик детектирования ОЗО предлагаемая методика позволяет: 1) обнаружить ОЗО любого размера по текстуре характерного для него компонента; 2) детально выделить компонен-

ты поверхности и провести компонентное разложение ОЗО, когда месторасположение ОЗО уже обнаружено; 3) полностью выделить ОЗО на снимках высокого и сверхвысокого пространственного разрешения с использованием комплекса МИП, просчитанного для различных текстур замусоривания.

Описание методики

Рассмотрим МИП, которые получаются исследованием зависимостей $y(x)$ яркости у одного канала космического (и любого другого) изображения от яркости x другого канала для заданного объекта детектирования (в нашем случае ОЗО и его компоненты) [17]. На рис. 1, а показана проекция (x, y) пространства информационных признаков, на котором координируется объект O поверхности земли в виде множества U координат (x_0, y_0) на проекции; $[x_{\min}, x_{\max}]$ – область определения, $[y_{\min}, y_{\max}]$ – область значений объекта. В общем виде в пространстве $\{X_i\}$ любой объект задается множеством U точек

$$A = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n].$$

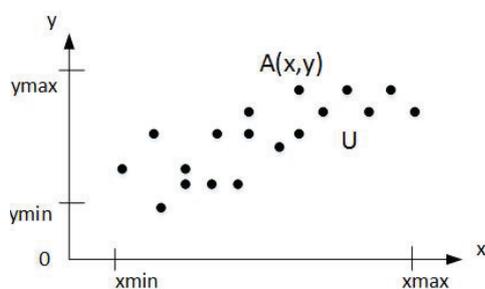
По всей видимости, если объект на изображении различается зрительно, то множество U будет иметь определенные закономерности в пространстве и не будет беспорядочным. Ясно, что данные закономерности выражаются функционально и объект аналитически можно записать в виде функционала, описывающего замкнутую гиперобласть, которая раскладывается на $2n^2$ функций и записывается в виде:

$$\begin{aligned} f_1(x) \leq y \leq f_2(x), \quad x_{\min} \leq x \leq x_{\max}, \\ x = x_i, \quad y = y_j, \quad i, j = 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (1)$$

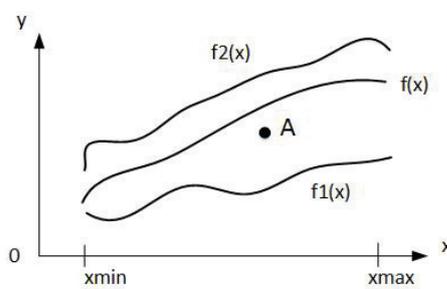
При фиксированном i (считаем, $i=1$) и варьировании $j=1, \dots, n$ имеем $2n$ функций минимумов $f_1(x)$ и максимумов $f_2(x)$ КСЯ y на j -м канале в зависимости от КСЯ x на 1-м (рис. 1, б):

$$\begin{aligned} f_1(x) \leq y \leq f_2(x), \quad x_{\min} \leq x \leq x_{\max}, \\ x = x_i, \quad y = y_j, \quad i = \text{const}, \quad j = 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (2)$$

При $i=j$ имеем $f_1(x)=f_2(x)$ при любых x – в проекции (x, y) точки объекта O лежат на линии $y=x$.



а/а



б/б

Рис. 1. а) объект в пространстве информационных признаков; б) представление объекта в пространстве. A – точка (пиксель) объекта O ; x_i – яркостные координаты точки A на i -х каналах; n – всего каналов

Fig. 1. а) object in informational signs space; б) representation of the object in space. A is the point (pixel) of the object O ; x_i are the luminance of the point A at i -x channels; n is the total number of channels

Соотношение (2) – ограничение соотношения (1), т. е. (1) и (2) не являются эквивалентами, но в большинстве случаев для детектирования объектов достаточно рассматривать (1) в тех или иных ограничениях, прежде всего, в виде (1).

Практически множество U можно получить по области-эталоны: «чистый» участок объекта, выделенный на космическом изображении, т. е. участок, который достоверно принадлежит данному объекту (и всему классу объектов данного типа). Его можно получить в интерактивном режиме просмотра снимка, обнаружив объект и выделив «чистую» область на нем (например, в ENVI). Тогда каждой координате точек полигональной области задаются КСЯ на всех каналах изображения.

Модель (1) имеет частные случаи, в каждом из которых рассматриваются различные модели МИП. Так, функции $f_1(x)$ и $f_2(x)$ для n каналов ($(n-1)$ каналов) от 1-го канала x могут быть заданы в виде аналитических зависимостей, например, полигональных:

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^m a_i x^i, \quad a = [a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_m],$$

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^m b_i x^i, \quad b = [b_1 \quad b_2 \quad \dots \quad b_m],$$

или по точкам в виде векторов:

$$f_1(x): \quad c = [c_1 \quad c_2 \quad \dots \quad c_k],$$

$$f_2(x): \quad d = [d_1 \quad d_2 \quad \dots \quad d_k].$$

В первом случае МИП задается в виде матриц:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & \dots & b_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ b_{m1} & \dots & b_{mn} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

В формуле (3) a_{ij} и b_{ij} – коэффициенты полиномов функций нижних и верхних порогов яркости на j -м канале от 1-го канала. Функции могут быть получены проведением регрессионного анализа. $m = \max(\{m_{j1}\}, \{m_{j2}\})$ – максимальный порядок полиномов, где m_{j1} (m_{j2}) – порядок оптимальной функции регрессии f_1 (f_2) на j -м канале. Задается область определения функций, т. е. вектор $u = [x_{\min} \quad x_{\max}]$ ми-

нимальной и максимальной яркости на 1-м канале, либо функции f_1, f_2 (также f и Δf) определяются для всех x от 0 до максимального КСЯ для данного типа снимков и приводятся к одному диапазону.

Во втором случае МИП задается в виде матриц:

$$\tilde{N} = \begin{bmatrix} \tilde{n}_{11} & \dots & \tilde{n}_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \tilde{n}_{k1} & \dots & \tilde{n}_{kn} \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ d_{k1} & \dots & d_{kn} \end{bmatrix}.$$

$k = q_{\max} + 1$ – число всевозможных значений яркости, которые может принимать поверхность земли для данного типа снимков; q_{\max} – максимальная яркость (например, для Landsat 4–5 $q_{\max} = 255$).

В другой модели вместо функций-порогов f_1 и f_2 задаются функции средних значений f_0 (аналитически или как вектор). Тогда отклонения от средних значений f_0 (рис. 1, б) могут быть выражены в виде числа Δf как среднего отклонения по всей области определения или в виде функции $\Delta f(x)$ (также аналитически или как вектор). $f_0(x)$ вычисляется как оптимальная функция регрессии, а отклонения, например, так:

$$\Delta f(x) = \max |y(x) - f_0(x)|, \quad \Delta f = E[\Delta f(x)],$$

$y(x)$ – множество точек объекта со значением x КСЯ на 1-м канале; $f_0(x)$ – значение при x ; E – среднее значение.

Алгоритмически в качестве функций $f_1, f_2, f_0, \Delta f$ следует задать линии регрессии соответствующих отчетных значений, а не сами эти значения, т. к. последние могут быть заданы не для всех x на интервале области определения $[x_{\min}, x_{\max}]$ (рис. 2).

Большинство объектов, особенно окрашенных в один цвет, описываются линейными зависимостями (рис. 2, а), т. е. функции f_0 имеют вид:

$$f_0(x) = k \cdot x + b.$$

Тогда если отклонения задаются в виде чисел, то МИП имеет вид:

$$K = [k_1 \quad \dots \quad k_n], \quad B = [b_1 \quad \dots \quad b_n],$$

$$D = [\Delta_1 \quad \dots \quad \Delta_n], \quad u = [x_{\min} \quad x_{\max}]. \quad (4)$$

В формуле (4): k_j и b_j – параметры отрезков прямых $f_0(x)$ на j -м канале, ограниченных областью

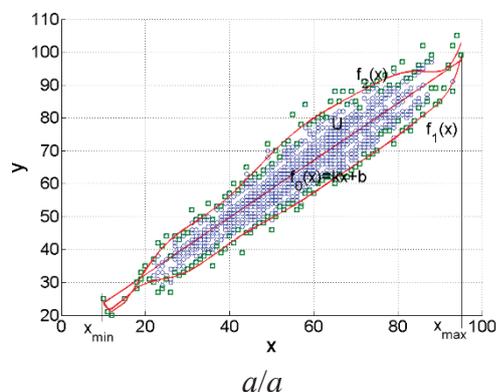


Рис. 2. Геометрический смысл функций: а) f_1, f_2, f_0 ; б) Δf

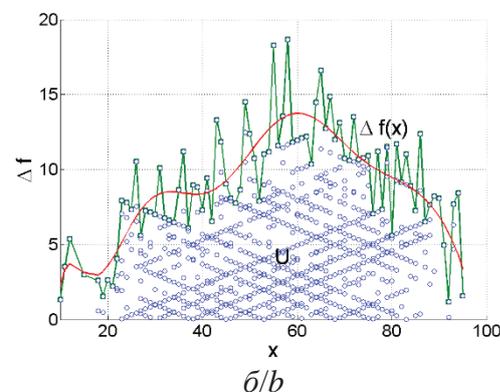


Fig. 2. Geometric meaning of the functions: а) f_1, f_2, f_0 ; б) Δf

определения u яркости на 1-м канале; Δ_j – отклонения допустимых точек объекта от средних значений $f_{ij}(x)$ на j -м канале.

Способ компонентного разложения может быть разным. Например, разложение на «светлую» и «темную» компоненты или их выделение в составе ОЗО возможно как по снимкам низкого, так и по снимкам высокого разрешения. Причем для снимков низкого разрешения (Landsat) достаточно видимых каналов спектра, если известны МИП «светлой» и «темной» компоненты.

Пиксель исходного изображения с яркостными координатами $A=(x,y)$ принадлежит тому компоненту c_j , заданному функциями $f_{ij}(x)$, $x=x_1=[x_{\min}, x_{\max}]$, $i=2, \dots, n$, где n – число каналов, для которого меньше расстояние от точки A до этих средних функций f_{ij} в пространстве информационных признаков. Запишем эти расстояния как сумму разностей до каждой функции:

$$\Delta_j = \sum_{i=1}^n |f_{ij}(x) - y_i|, \quad f_{ij} = \frac{1}{2}(x_{\min} + x_{\max}).$$

Если исходное изображение большое, его можно нарезать на участки и для каждого провести компонентное разложение. Так как процедура компонентного разложения проводится попиксельно, результат не зависит от кратности нарезки.

Результаты работы алгоритма

Покажем результаты работ методики на примере участка полигона твердых бытовых отходов (ТБО) Кучино Московского региона.

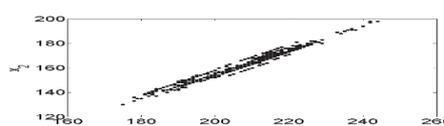
На рис. 3 приведено представление в пространстве информационных признаков множества U для текстуры компонента поверхности [18–20] полигона ТБО Кучино на снимке высокого разрешения. Исходное изображение – WorldView2 с приведением гистограммы к диапазону 0–255 в видимом спектре. Канал 1 – красный, 2 – зеленый, 3 – синий. Выделенный участок компонента ОЗО (тип грунта) однороден, в связи с чем зависимости $x_2(x_1)$, $x_3(x_1)$, $x_3(x_2)$ линейны. При этом функции $f_1(x_1)$ и $f_2(x_1)$ в общем случае нелинейны. На рис. 4 пример компонентного разложения.

На входе (а) – участок космического снимка WorldView2, приведенный к диапазону 0–255 препарированием гистограммы КСЯ. Модель поверх-

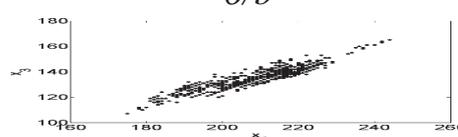
ности (б) составляют 6 компонент (рис. 5): металл (а), загрязненная растительность (б), уплотненная земля (в), открытые отходы (г), смесь отходов и грунта (д), открытый грунт (е).



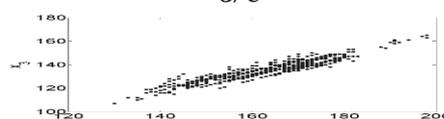
a/a



б/б



в/с



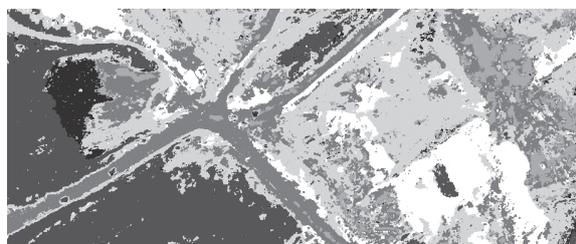
г/д

Рис. 3. а) Выделение эталона (ENVI); б–г) множество U : б) проекция (x_1, x_2) , в) проекция (x_1, x_3) , г) проекция (x_2, x_3) ;

Fig. 3. а) Allocation of a benchmark (ENVI); б–d) the set U : б) projection (x_1, x_2) , в) projection (x_1, x_3) , г) projection (x_2, x_3)



a/a



б/б

Рис. 4. Пример компонентного разложения поверхности: а) исходное изображение; б) общее компонентное изображение [участок полигона ТБО Кучино, WorldView2]

Fig. 4. Example of component decomposition of the surface: а) original image; б) common component image [plot of landfill Kuchino, WorldView2]

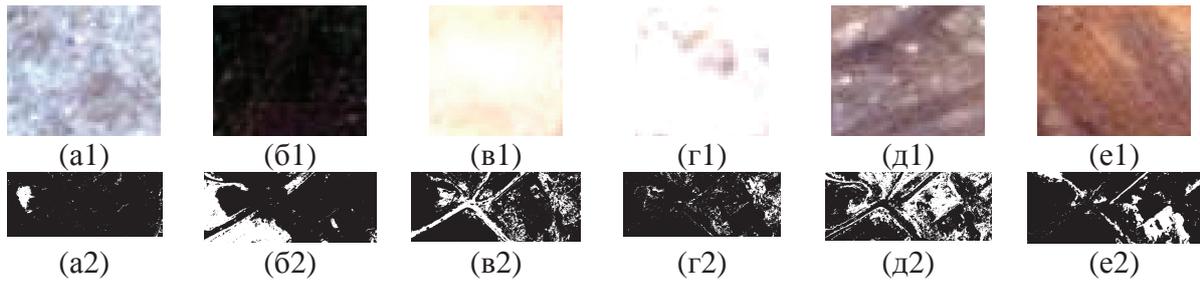


Рис. 5. Компоненты разложения: 1) текстуры компонент, 2) компонентные изображения; компоненты: а) c_1 , б) c_2 , в) c_3 , г) c_4 , д) c_5 , е) c_6

Fig. 5. Decomposition components: 1) component texture, 2) component image; components: а) c_1 , б) c_2 , в) c_3 , г) c_4 , д) c_5 , е) c_6

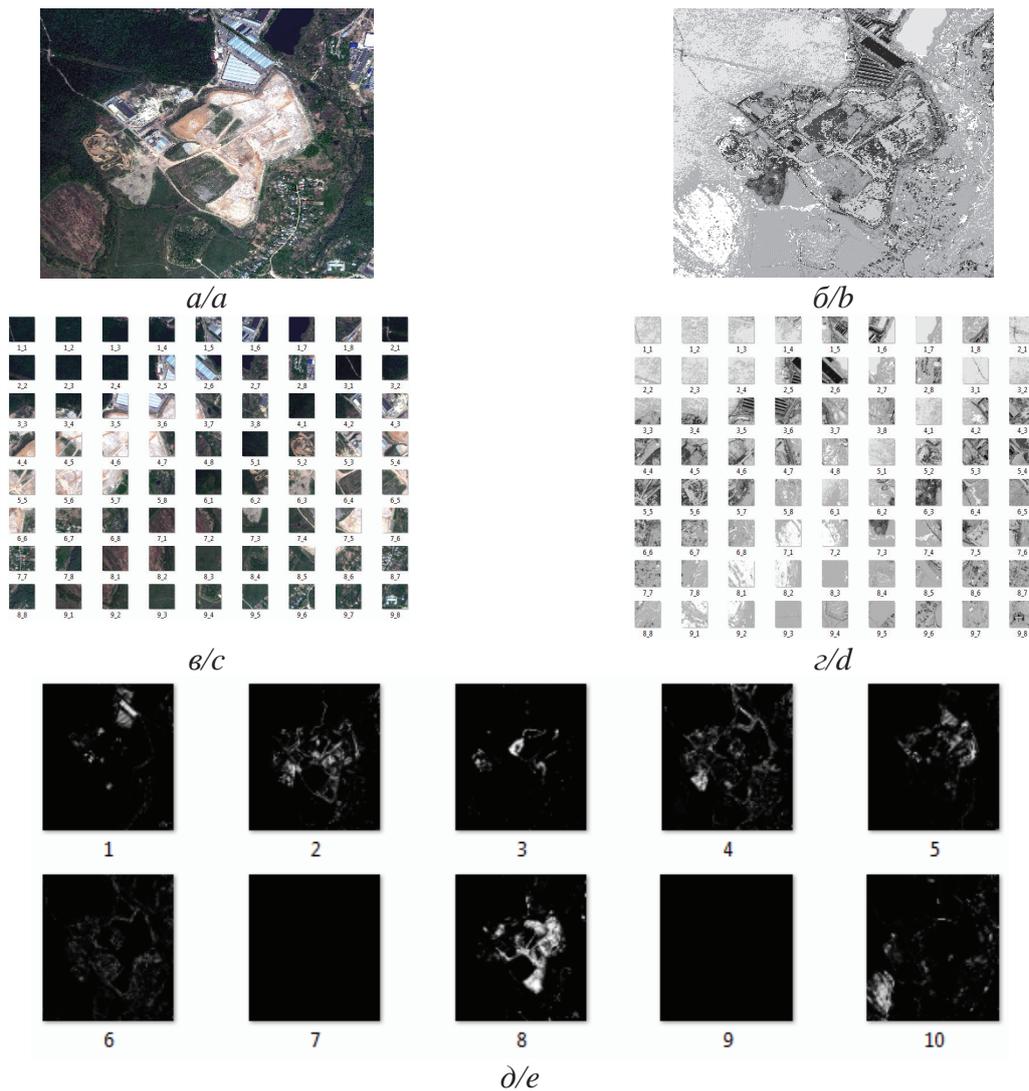


Рис. 6. Компонентное разложение больших изображений: а) исходное изображение; б) общее компонентное изображение (интегрирование участков); в) дифференцирование исходного изображения на участки; г) дифференцирование общего компонентного изображения; д) матрица компонентных изображений

Fig. 6. Component decomposition of large images: а) original image; б) common component image (integration sites); в) differentiation of the original image into sections; г) differentiation of the common component image; д) matrix of component images

Процедура компонентного разложения большого изображения проводится разбиением на участки, результат не зависит от кратности деления (рис. 6).

Оценка достоверности предлагаемой методики подтверждена проведением верификации фрагмента участка замусоривания контактными методами мониторинга (обходом участка складирова-

ния) и сопоставлением полученных данных с результатами космического мониторинга.

Заключение

Для детектирования текстур поверхности земли требуется база МИП. Несмотря на то, что по готовой базе МИП объект (ОЗО) и его компоненты детектируются автоматически, сами МИП находятся в автоматизированном режиме и с применением интерактивной обработки (хотя воз-

можно приведение к автоматическому способу формирования МИП). Однако разметка эталонов компонент и расчет МИП разных компонент по ключевым ОЗО дает базу данных МИП, применимую к любым другим ОЗО. Такая база данных, разработанная не только по ОЗО, но и по другим объектам, позволяет детектировать объекты поверхности земли по их характерным компонентам и проводить компонентное разложение объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казарян М.Л., Рихтер А.А., Шахраманьян М.А. Метод автоматизации оценки индексов подстилающей поверхности и их изменения во времени по космическим изображениям и его применение при оценке состояния окружающей среды в окрестности полигонов твердых бытовых отходов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 8. – С. 52–58.
2. Рихтер А.А., Шахраманьян М.А., Казарян М.Л. Метод визуального детектирования в задаче космического мониторинга объектов захоронения отходов // Вестник Владикавказского научного центра. – 2015. – Т. 15. – № 3. – С. 61–67.
3. Шахраманьян М.А., Казарян М.Л., Рихтер А.А. Выявление очагов замусоривания по данным космических изображений низкого пространственного разрешения Landsat // Информатика и космос. – 2016. – № 3. – С. 91–96.
4. Абросимов А.В., Никольский Д.Б., Шешукова Л.В. Использование космических снимков и геоинформационных технологий для мониторинга мест складирования отходов // Экология урбанизированных территорий. – 2014. – № 1. – С. 38–43.
5. Nádudvari Á. Thermal mapping of self-heating zones on coal waste dumps in Upper Silesia (Poland) – a case study // International Journal of Coal Geology. – 1 August 2014. – V. 128–129. – P. 47–54.
6. Integrated remote sensing for multi-temporal analysis of anthropogenic activities in the south-east of Mt. Vesuvius National Park / C. Manzo, A. Mei, G. Fontinovo, A. Allegrini, C. Bassani // Journal of African Earth Sciences. – October 2016. – V. 122. – P. 63–78.
7. Studying bio-thermal effects at and around MSW dumps using Satellite Remote Sensing and GIS / Khalid Mahmood, Syeda Adila Batool, Muhammad Nawaz Chaudhry // Waste Management. – September 2016. – V. 55. – P. 118–128.
8. Using imaging spectroscopy to map red mud dust waste: the Podgorica Aluminum Complex case study / S. Pascucci, C. Belviso, R.M. Cavalli, A. Palombo, S. Pignatti, F. Santini // Remote Sensing of Environment. – August 2012. – V. 123. – P. 139–154.
9. Бровкина О.В. Дистанционный мониторинг антропогенных нарушений таежной зоны северо-запада России: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – Санкт-Петербург, 2011. – 120 с.
10. Аристов М.В. Мониторинг полигонов ТБО и обнаружение стихийных мусоросвалок по данным космической съемки // Гео-профиль. – 2009. – № 2. – С. 60–65.
11. Погорелов А.В., Дулепа С.В., Липилин Д.А. Опыт космического мониторинга свалок на территории Краснодарского края // Геоматика. – 2013. – № 4. – С. 64–72.
12. Мониторинг состояния недр на полигоне захоронения ЖРО / Л.Н. Александрова, М.Л. Глинский, А.А. Зубков, В.В. Данилов, Л.Г. Чертков // Безопасность окружающей среды. – 2009. – № 4. – С. 66–70.
13. Improved visual information fidelity based on sensitivity characteristics of digital images / Tien-Ying Kuo, Po-Chyi Su, Cheng-Mou Tsai // Journal of Visual Communication and Image Representation. – October 2016. – V. 40. – P. A. – P. 76–84.
14. Deep learning and mapping based ternary change detection for information unbalanced images / Linzhi Su, Maoguo Gong, Puzhao Zhang, Mingyang Zhang, Jia Liu, Hailun Yang // Pattern Recognition, In Press, Accepted Manuscript. – March 2017. – V. 63. – P. 1–14.
15. Cheng Liu, Weibin Liu, Weiwei Xing. An improved edge-based level set method combining local regional fitting information for noisy image segmentation // Signal Processing. – January 2017. – V. 130. – P. 12–21.
16. Kalpana Goyal, Jyoti Singhai. Texture-based self-adaptive moving object detection technique for complex scenes // Computers & Electrical Engineering. – October 2016. – V. 44. – P. 17–24.
17. Казарян М.Л., Шахраманьян М.А., Рихтер А.А. Метод автоматизации обнаружения и выделения объектов захоронения отходов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 8–2. – С. 281–286.
18. Mazur A.K., Wählin A.K., Krężel A. An object-based SAR image iceberg detection algorithm applied to the Amundsen Sea // Remote Sensing of Environment. – February 2017. – V. 189. – P. 67–83.
19. Unsupervised change detection in VHR remote sensing imagery – an object-based clustering approach in a dynamic urban environment // T. Leichtle, Ch. Geiß, M. Wurm, T. Lakes, H. Taubenböck // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – February 2017. – V. 54. – P. 15–27.
20. Gong Cheng, Junwei Han. A survey on object detection in optical remote sensing images // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – July 2016. – V. 117. – P. 11–28.

Поступила 17.02.2017 г.

Информация об авторах

Казарян М.Л., кандидат физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой математики и информатики Владикавказского филиала Финансового университета при Правительстве Российской Федерации.

Рихтер А.А., инженер НИИ АЭРОКОСМОС.

Шахраманьян М.А., доктор технических наук, профессор кафедры математики и информатики Владикавказского филиала Финансового университета при Правительстве Российской Федерации; заместитель директора НИИ АЭРОКОСМОС.

UDC 004.932.2

METHOD OF AUTOMATIC DETECTING THE COMPONENTS OF WASTE DISPOSAL OBJECTS BY SPACE IMAGES

Maretta L. Kazaryan¹,
maretta@bk.ru

Andrey A. Richter²,
urfin17@yandex.ru

Michail A. Shakhramanian^{1,2},
7283963@mail.ru

¹ Financial University at Government of the Russian Federation, Vladikavkaz Branch,
7, Molodezhnaya street, Vladikavkaz, 362001, Russia.

² Research Institute AEROCOSMOS,
4, Gorokhovoy by-street, Moscow, 105064, Russia.

The authors propose the method of automatically separation of components of waste objects and decomposition of the object surface to the components by space images. The technique allows constructing a model of surface of structural objects, such as solid waste landfills and municipal landfill sites, made up of several components, given by the different surface textures. The paper used the matrix of information signs, identifying a particular component, their mathematical model and various presentation forms are given. The paper introduces the concepts of surface component images and overall surface component images, which reflect in details the detection areas corresponding to different surface textures. The authors have described the criterion of pixel belonging to one or another component, characterized by a complex of matrices of information signs. There is an opportunity of processing the earth's surface area of any size and process automation.

The main aim of the study is to develop a method of automatic detection of components of waste objects for space images.

The methods used in the study: the regression analysis methods, statistical methods and processing of satellite images.

Results. The paper introduces the results of the method on the example of landfill Kuchino (village Saltykovsk, Balashikha District of Moscow Region) and projection representation of information space of standard values of the covering area with the given texture. The example of component decomposition of landfill waste section fragment: images of six components and the total component image is shown. The authors constructed the component decomposition of the full waste area: differentiation of the original visible image WorldView2 of a dump cover into small sections, component decomposition of each sites and its integration.

Kew words:

Space image, waste disposal object, landfill, texture, matrix of information signs, component, detection, separation, surface components, surface model, component model, component decomposition.

REFERENCES

1. Kazaryan M.L., Rikhter A.A., Shakhramanyan M.A. Method for automating estimation of surface indices and their time changes using space images. Application of the method in assessing the environment state in the vicinity of solid waste landfills. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 8, pp. 52–58. In Rus.
2. Rikhter A.A., Shakhramanyan M.A., Kazaryan M.L. The visual detection method in space monitoring of waste disposal sites. *Vestnik Vladikavkazskogo nauchnogo tsentra*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 61–67. In Rus.
3. Shakhramanyan M.A., Kazaryan M.L., Rikhter A.A. Identifying pockets of debris by satellite images of low spatial resolution Landsat. *Informatsiya i kosmos*, 2016, no. 3, pp. 91–96. In Rus.
4. Abrosimov A.V., Nikolskiy D.B., Sheshukova L.V. Using satellite imagery and GIS technologies for monitoring waste storage sites. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy*, 2014, no. 1, pp. 38–43. In Rus.
5. Nádudvari Á. Thermal mapping of self-heating zones on coal waste dumps in Upper Silesia (Poland) – a case study. *International Journal of Coal Geology*, 1 August 2014, vol. 128–129, pp. 47–54.
6. Manzo C., Mei A., Fontinovo G., Allegrini A., Bassani C. Integrated remote sensing for multi-temporal analysis of anthropogenic activities in the south-east of Mt. Vesuvius National Park/Original Research Article. *Journal of African Earth Sciences*, October 2016, vol. 122, pp. 63–78.
7. Khalid Mahmood, Syeda Adila Batoool, Muhammad Nawaz Chaudhry. Studying bio-thermal effects at and around MSW dumps using Satellite Remote Sensing and GIS. *Waste Management*, September 2016, vol. 55, pp. 118–128.
8. Pascucci S., Belviso C., Cavalli R.M., Palombo A., Pignatti S., Santini F. Using imaging spectroscopy to map red mud dust waste: the Podgorica Aluminum Complex case study. *Remote Sensing of Environment*, August 2012, vol. 123, pp. 139–154.
9. Brovkina O.V. *Distantionny monitoring antropogennykh narusheniy taezhnoy zony severo-zapada Rossii*. Dis. Kand. Nauk [Remote monitoring of anthropogenic disturbances in taiga north-west zone of Russia. Cand. Diss.]. St.-Petersburg, 2011. 120 p.
10. Aristov M.V. Monitoring of landfill and detection of natural landfills according to satellite imagery. *Geoprofil*, 2009, no. 2, pp. 60–65. In Rus.
11. Pogorelov A.V., Dulepa S.V., Lipilin D.A. The experience of landfills space monitoring in Krasnodar Territory. *Geomatika*, 2013, no. 4, pp. 64–72. In Rus.
12. Aleksandrova L.N., Glinskiy M.L., Zubkov A.A., Danilov V.V., Chertkov L.G. Monitoring subsoil status at the LRW dumping site. *Bezopasnost okruzhayushchey sredy*, 2009, no. 4, pp. 66–70. In Rus.

13. Tien-Ying Kuo, Po-Chyi Su, Cheng-Mou Tsai. Improved visual information fidelity based on sensitivity characteristics of digital images. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, October 2016, vol. 40, P. A, pp. 76–84.
14. Linzhi Su, Maoguo Gong, Puzhao Zhang, Mingyang Zhang, Jia Liu, Hailun Yang. Deep learning and mapping based ternary change detection for information unbalanced images. *Pattern Recognition*, March 2017, vol. 63, pp. 1–14.
15. Cheng Liu, Weibin Liu, Weiwei Xing. An improved edge-based level set method combining local regional fitting information for noisy image segmentation. *Signal Processing*, January 2017, vol. 130, pp. 12–21.
16. Kalpana Goyal, Jyoti Singhai. Texture-based self-adaptive moving object detection technique for complex scenes. *Computers & Electrical Engineering*, October 2016, vol. 44, pp. 17–24.
17. Kazaryan M.L., Shakhramanyan M.A., Rikhter A.A. The method of automated detection and isolation of waste disposal facilities. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2015, no. 8–2, pp. 281–286. In Rus.
18. Mazur A.K., Wählin A.K., Krężel A. An object-based SAR image iceberg detection algorithm applied to the Amundsen Sea. *Remote Sensing of Environment*, February 2017, vol. 189, pp. 67–83.
19. Leichtle T., Geiß Ch., Wurm M., Lakes T., Taubenböck H. Unsupervised change detection in VHR remote sensing imagery – an object-based clustering approach in a dynamic urban environment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, February 2017, vol. 54, pp. 15–27.
20. Gong Cheng, Junwei H. A survey on object detection in optical remote sensing images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, July 2016, vol. 117, pp. 11–28.

Received: 17 February 2017.

Information about the authors

Maretta L. Kazaryan, Cand. Sc., associate professor, head of the department, Financial University at Government of the Russian Federation.

Andrey A. Richter, engineer, Research Institute AEROCOSMOS.

Michail A. Shachramanian, Dr. Sc., professor, Financial University at Government of the Russian Federation, Vladikavkaz Branch; deputy director, Research Institute AEROCOSMOS.

УДК 543.31:57.044(282.256.3)

СОДЕРЖАНИЕ МЕТАЛЛОВ В ВОДЕ Р. ЕНИСЕЙ НА УЧАСТКЕ ОТ Г. КРАСНОЯРСКА ДО УСТЬЯ Р. АНГАРА В 2010–2015 ГГ.

Дементьев Дмитрий Владимирович¹,
dementyev@gmail.com

Болсуновский Александр Яковлевич¹,
radecol@ibp.ru

Борисов Роман Владимирович^{1,2},
roma_boris@list.ru

Александрова Юлия Владимировна¹,
yuliyana_aleksandrova@mail.ru

¹ Институт биофизики СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН,
Россия, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/50.

² ИХХТ СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН,
Россия, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/24.

Актуальность работы обусловлена необходимостью получения достоверной информации о концентрациях химических элементов в воде р. Енисей в условиях непрерывной антропогенной нагрузки.

Цель работы: оценка уровня содержания концентраций химических элементов природного и техногенного происхождения Na, K, Ca, Mg, Zn, Cu, Ba, Al, Mn, U, Mo, Cr, Ni, As, Co, Sr, Fe, Pb, Cd, Bi в воде р. Енисей на участке от г. Красноярска до устья р. Ангара.

Методы исследования. Валовое содержание элементов определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе Agilent 7500a.

Результаты. Выполнена оценка уровня содержания 20 химических элементов в водах р. Енисей на участке от г. Красноярска до устья р. Ангары (п. Стрелка) за период с 2010 по 2015 годы. В результате сравнения полученных данных с уровнями предельно-допустимых концентраций выявлено, что для исследуемого участка р. Енисей характерны повышенные содержания Fe, Cu, Mn, Al, Zn. За весь период наблюдения средние концентрации составляют 1...2 значений предельно-допустимой концентрации для вод рыбохозяйственного назначения (ПДК_{рх}) для Fe и 1...5 значений ПДК_{рх} для Cu. Для средних значений Mn ниже по течению от Красноярска на 90 км (вблизи с. Атаманово и п. Стрелка) характерны величины в 1...3 ПДК_{рх}. Установлена некоторая тенденция к повышению концентраций Cu, Fe, Zn в воде ниже по течению от Красноярска, которая, вероятно, связана с расположением в этом районе промышленного комплекса г. Железногорска и с впадением в реку Енисей реки Кан, с расположенными на ней крупными промышленными предприятиями, прежде всего в г. Зеленогорске.

Ключевые слова:

Вода, тяжёлые металлы, микроэлементы, мониторинг, река Енисей, качество поверхностных вод.

Введение

Вода является одним из наиболее распространённых ресурсов в мире, но менее 1 % вод доступно и безопасно для потребления человеком. Загрязнение поверхностных вод вследствие антропогенной деятельности является большой экологической проблемой, с которой сталкиваются по всему миру. Среди загрязняющих веществ значительное влияние на качество природных вод оказывают тяжёлые металлы, которые в растворённой или взвешенной форме способны мигрировать в водных средах на значительные расстояния. Большое внимание исследователей из разных стран [1–9] уделяется изучению содержания и распределения химических элементов в природных водах и гидробионтах. В России Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды проводится регулярный мониторинг качества поверхностных вод по ряду показателей [10]. Наряду с этим учёные в регионах проводят исследования по определению содержания химических веществ

в водных объектах вблизи агломераций и крупных промышленных предприятий, определяют возможные причины загрязнения вод и исследуют пути миграции элементов [11–13].

Река Енисей – одна из крупнейших рек мира, является природной границей между Западной и Восточной Сибирью. Обширные пространства бассейна (общая площадь – 2,58 млн км²) характеризуются весьма сложным рельефом, от горного до равнинного. Енисей – самая многоводная река России снегового питания; наиболее многоводные месяцы май–июль, а летние минимумы расхода воды приходятся на сентябрь–октябрь [10]. Неудивительно, что ряд работ посвящён изучению загрязнений р. Енисей и ее притоков. Разными авторами [14–21] определены концентрации металлов, фенолов, нефтепродуктов, пестицидов, нитритов, ионов аммония, фосфатов и органических веществ в воде и основных компонентах экосистемы р. Енисей на участке от г. Красноярска до г. Игарки, включая самый крупный приток – р. Ангару, и в

некоторых случаях отмечены превышения установленных нормативов. В нашей предыдущей работе [22] было исследовано содержание тяжёлых металлов в донных отложениях р. Енисей вблизи г. Красноярск и выявлены повышенные содержания Cd и Ni, присутствие которых может быть обусловлено загрязнением воды. Таким образом, получение новых независимых данных относительно качества воды р. Енисей представляется весьма актуальной задачей.

Цель настоящей работы – определение концентраций химических элементов природного и техногенного происхождения Na, K, Ca, Mg, Zn, Cu, Ba, Al, Mn, U, Mo, Cr, Ni, As, Co, Sr, Fe, Pb, Cd, Bi в воде р. Енисей на участке от г. Красноярск до устья р. Ангара в период 2010–2015 гг.

Объекты и методы

Пробы воды отбирали (в соответствии с Р.52.24.353–2012, ГОСТ Р 51592–2000) в 2010–2015 гг. с марта по декабрь на участках р. Енисей, показанных на схеме (рис. 1). Все точки отбора были разделены на 5 участков: У1) вне зоны влияния промышленных предприятий, выше по течению г. Красноярск; У2) в зоне влияния промышленных стоков – в черте Красноярск; У3) ниже по течению от Красноярск до п. Есаулово; У4) вблизи населённых пунктов с. Атаманово и п. Б. Балчуг в зоне влияния промышленного комплекса г. Железногорск (Горно-химический комбинат ГК Росатом и др.); У5) вблизи населённых пунктов п. Каргино и п. Стрелка, удалённых на 230–250 км от промышленного комплекса г. Железногорск и после впадения р. Кан, с расположенными на реке крупными промышленными предприятиями, прежде всего в г. Зеленогорске. Расстояние между крайними точками отбора составило около 350 км.

Отбор проб осуществляли с лодки батометром-бутылкой на штанге из поверхностного слоя (30–50 см) на фарватере реки и в прибрежной зоне правого берега (кроме участка У1, где пробы отбирались в прибрежной зоне левого берега). Общее количество составило порядка 300 проб. Пробы сливались в полимерные канистры, предварительно промытые дистиллированной водой и водой в точке отбора. Пробы воды консервировали азотной кислотой (ОС.Ч. 27–4), фильтровали через фильтр «синяя лента» в одноразовые пробирки объёмом 20 мл в двух параллелях и хранили до измерения при температуре +4 °С. Содержание растворённых форм химических элементов определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе Agilent 7500a. Данный метод хорошо зарекомендовал себя при проведении различных гидрохимических исследований с определением содержания элементов вплоть до фоновых уровней [23, 24]. Для калибровки прибора использовали стандартные растворы, содержащие 10 мкг/л ^7Li , ^{89}Y , ^{140}Cs и ^{205}Tl , и внутренние стандарты. Статистическую обработку проводили с использованием

программы Excel пакета Microsoft Office. Для исследуемых элементов на каждом участке были рассчитаны средние значения по всем точкам для каждого года отбора и стандартные отклонения. Уровень загрязнённости воды по содержанию элементов определяли сравнением полученных концентраций растворённых форм с законодательно регламентированными предельно допустимыми концентрациями для вод хозяйственно-питьевого (ПДКв) [25] и рыбохозяйственного (ПДКрх) [26] назначения. В работе использовали средние значения по участкам за годовой период. В случаях большого разброса значений приведены результаты анализа по отдельным (единичным) точкам отбора. При обсуждении результатов элементы сгруппированы в блоки по значениям их концентраций для наглядности графического материала.

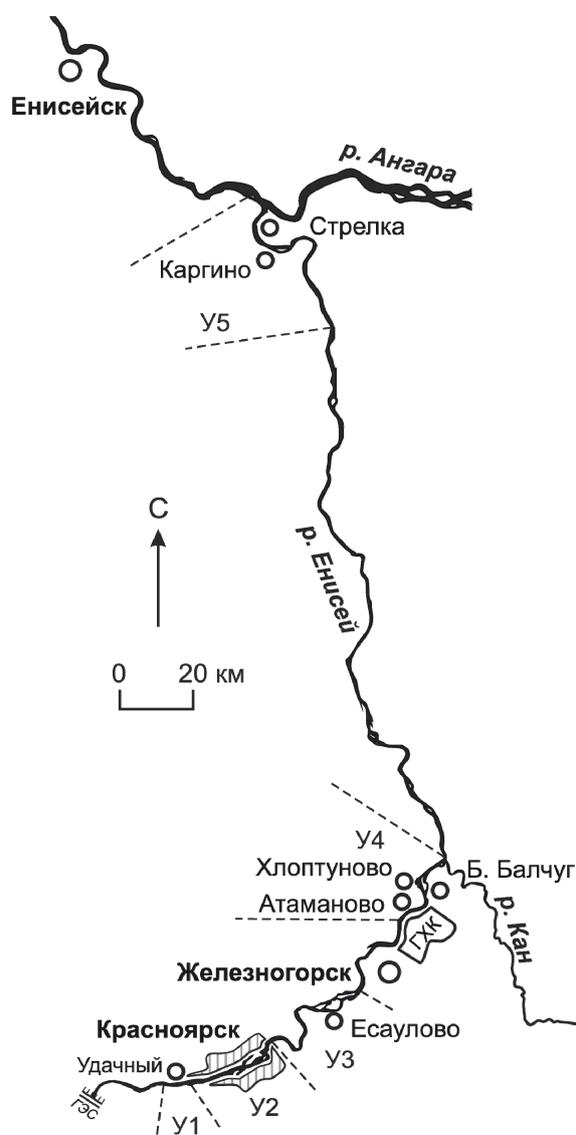


Рис. 1. Карта-схема района отбора проб воды (У1–У5 – участки отбора проб)

Fig. 1. Schematic map of the water sampling region (У1–У5 are the sampling areas)

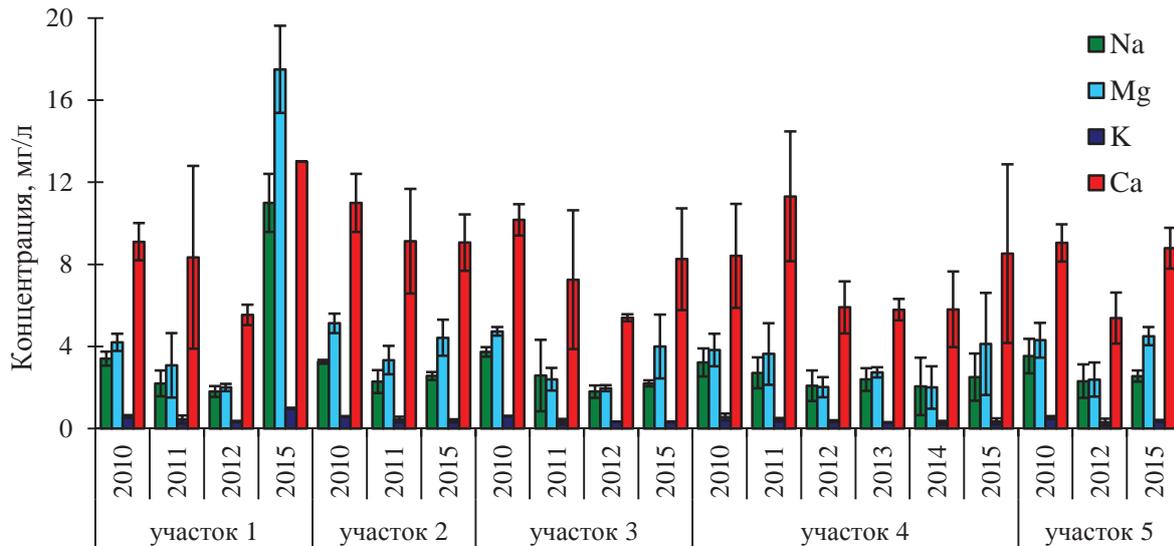


Рис. 2. Средние значения концентраций (мг/л) Na, Mg, K, Ca в пробах воды р. Енисей

Fig. 2. Average concentrations (mg/L) of Na, Mg, K, Ca in samples of the Yenisei River water

Результаты исследования и их обсуждение

Концентрация Na, Mg, K, Ca в воде р. Енисей. На рис. 2. представлены данные по среднему содержанию макрокомпонентов Na, Mg, K, Ca в 2010–2015 гг. в воде р. Енисей. Концентрации данных металлов намного ниже значений ПДК_в и ПДК_{рх} и не отличаются от данных, полученных в предыдущие периоды [16]. Для отдельных точек отбора содержание варьируется в широких пределах (мг/л): Na 1,3...7,8; Mg 1,4...19; K 0,05...1,0; Ca 3,0...27,0.

Концентрация Sr и Fe в воде р. Енисей. Средние концентрации Sr в воде на 3 порядка ниже, чем в донных отложениях [22], и не превышают ПДК_в (7 мг/л) и ПДК_{рх} (0,4 мг/л). Однако в октябре 2015 из 10 точек отбора на участке У4 в двух точках (р. Енисей, п. Хлоптуново) наблюдались значения (0,61, 0,73 мг/л), превышающие ПДК_{рх}. По временной динамике можно выделить более

высокие содержания в 2015 г. на всех участках относительно прошлых лет.

Загрязнение природных вод ионами железа возможно как в результате антропогенной деятельности, так и естественным путём при механическом разрушении и растворении горных пород. Содержание Fe в поверхностных водах суши составляет десятые доли миллиграмма [27]. Средние концентрации Fe в воде р. Енисей в большинстве случаев превышают ПДК_{рх} (0,1 мг/л), но не превышают ПДК_в (0,3 мг/л) за весь период наблюдения. При этом в отдельных точках отбора концентрации превосходят регламентированные значения. Так, на участке У4 в июле 2011 г. в 7 точках значения Fe составляют 0,35...0,42 мг/л, в июне 2013 – 0,58 мг/л. Максимальное значение 0,88 мг/л обнаружено на участке У5 в октябре 2015 г. В работах [10, 16, 20] также было показано повышенное содержание Fe в воде р. Енисей ниже

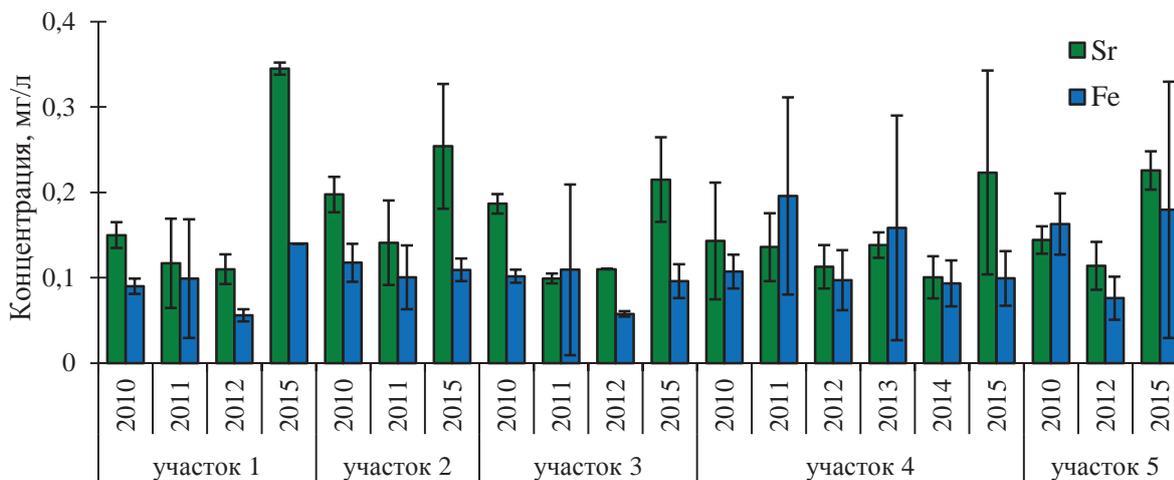


Рис. 3. Средние значения концентраций (мг/л) Sr и Fe в пробах воды р. Енисей

Fig. 3. Average concentrations (mg/L) of Sr and Fe in samples of the Yenisei River water

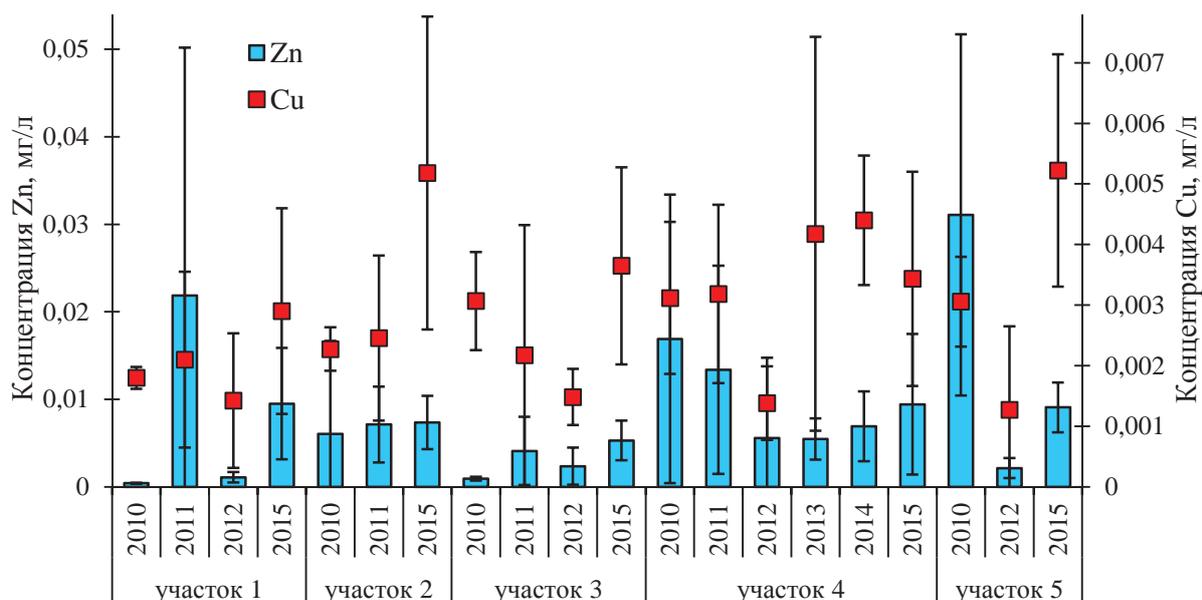


Рис. 4. Средние значения концентраций (мг/л) Zn и Cu в пробах воды р. Енисей

Fig. 4. Average concentrations (mg/L) of Zn and Cu in samples of the Yenisei River water

г. Красноярска. Например, содержание железа в фарватере р. Енисей в районе г. Игарки (нижнее течение) в 2011–2012 гг. составило 0,4 мг/л [20].

Концентрация Cu и Zn в воде р. Енисей. Содержание меди в природных пресных водах колеблется от 0,002 до 0,03 мг/л, а цинка – от 0,003 до 0,12 мг/л [27]. Основным источником поступления меди и цинка в природные воды являются сточные воды предприятий химической и металлургической промышленности. Для цинка также характерны пути попадания в воду при процессах разрушения и растворения горных пород и минералов. ПДКв для Zn составляет 1 мг/л; ПДКрх – 0,01 мг/л, а для Cu – 1 и 0,001 мг/л соответствен-

но. Установлено, что средние значения содержания Cu во всех случаях превышают ПДКрх, а для Zn в определённые периоды (рис. 4). По точкам отбора концентрации сильно изменяются: 0,00045...0,014 мг/л для Cu, 0,0004...0,071 мг/л для Zn.

Концентрация Ba, Al и Mn в воде р. Енисей. В 2015 г. можно отметить более высокие содержания Ba, чем в предыдущие годы. Однако во всех точках значения не превышают нормативов, изменяясь от 0,02 до 0,12 мг/л. В работе [10] показано, что для р. Енисей характерны повышенные содержания Al и Mn. Действительно, среднее содержание Al в 2015 г. на всех участках и в 2011, 2014 гг.

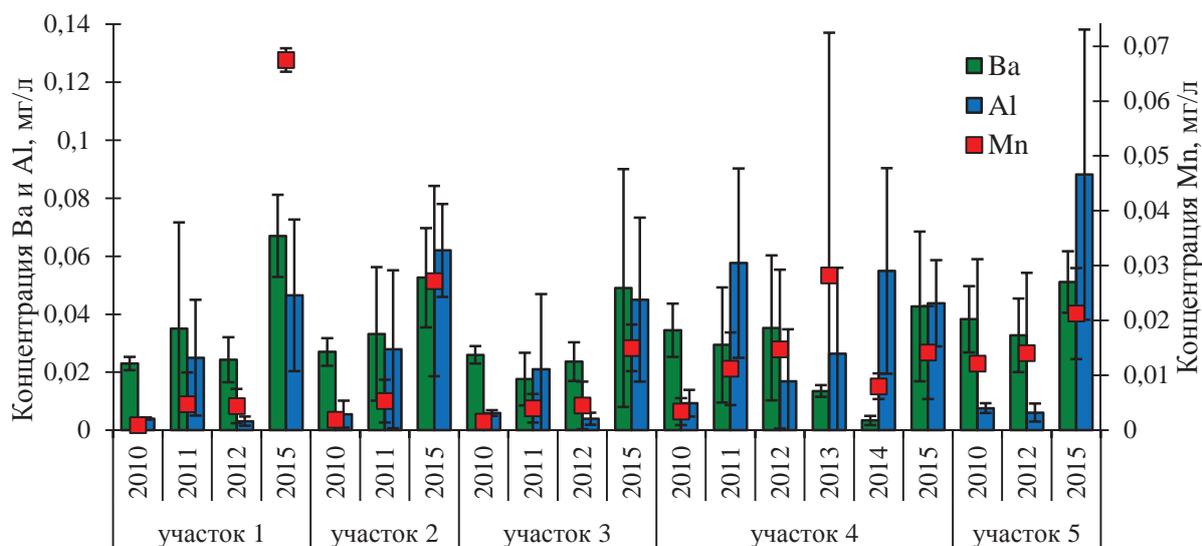


Рис. 5. Средние значения концентраций (мг/л) Ba, Al и Mn в пробах воды р. Енисей

Fig. 5. Average concentrations (mg/L) of Ba, Al and Mn in samples of the Yenisei River water

на участке У4 составляют 0,04...0,07 мг/л и превышают ПДК_{рх} (0,04 мг/л). По отдельным точкам отбора концентрации Al сильно изменяются (0,001...0,16 мг/л), что видно из значений стандартных отклонений (рис. 5). Например, в 2011 г. в ряде точек отбора на участке У4 обнаружены концентрации Al в воде 0,10...0,12 мг/л, что превышает ПДК_{рх} (0,04 мг/л) в 3 раза. Концентрации Mn по точкам отбора варьируются от 0,00026 до 0,18 мг/л, превышая ПДК_в (0,1 мг/л) в 2 раза. В некоторых случаях превышение ПДК_{рх} (0,01 мг/л) характерно и для средних значений.

Концентрация Cr, Ni и As в воде р. Енисей. Средние значения Cr, Ni и As (рис. 6) не превышают значение ПДК_{рх} (0,02, 0,01, 0,05 мг/л) и ПДК_в (0,05, 0,02, 0,01 мг/л) соответственно. По отдельным точкам отбора концентрации варьируются в следующих пределах: 0,0002...0,0099 мг/л для Cr;

0,0008...0,01 мг/л для Ni; 0,0002...0,004 для As, согласуясь с данными, полученными другими исследователями [10, 16, 17].

Концентрация Mo, Co и U в воде р. Енисей. Средние значения Co и Mo (рис. 7) не превышают нормативов ПДК_{рх} (0,01, 0,01 мг/л) и ПДК_в (0,1, 0,07 мг/л) соответственно. По точкам отбора значения изменялись в широких пределах: для Co 0,00002...0,0011 мг/л, а для Mo 0,0001...0,006 мг/л. Следует отметить более высокие содержания Mo в воде на всех участках в 2010 и 2015 гг.

Ранее в работе [21] было показано загрязнение р. Енисей и его притоков – р. Кан и р. Большая Тель – изотопами урана вблизи крупных промышленных предприятий Красноярского края. В настоящей работе установлено, что средние значения U (рис. 7) не превышают ПДК_в (0,015 мг/л). По точкам отбора изменение концентрации составило 0,00008...0,0015 мг/л. Полученные значения

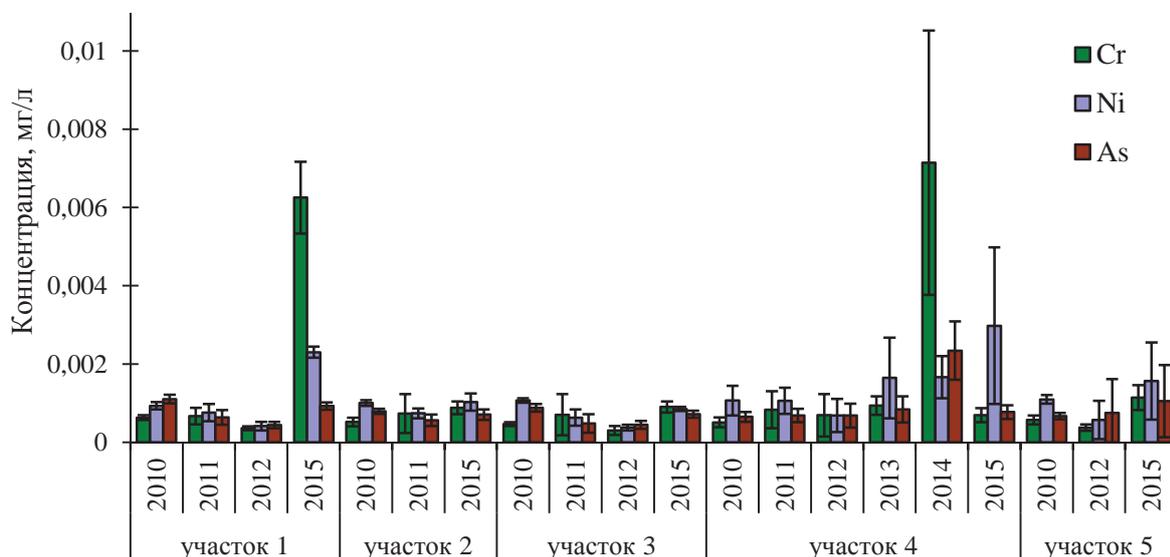


Рис. 6. Средние значения концентраций (мг/л) Cr, Ni и As в пробах воды р. Енисей

Fig. 6. Average concentrations (mg/L) of Cr, Ni and As in samples of the Yenisei River water

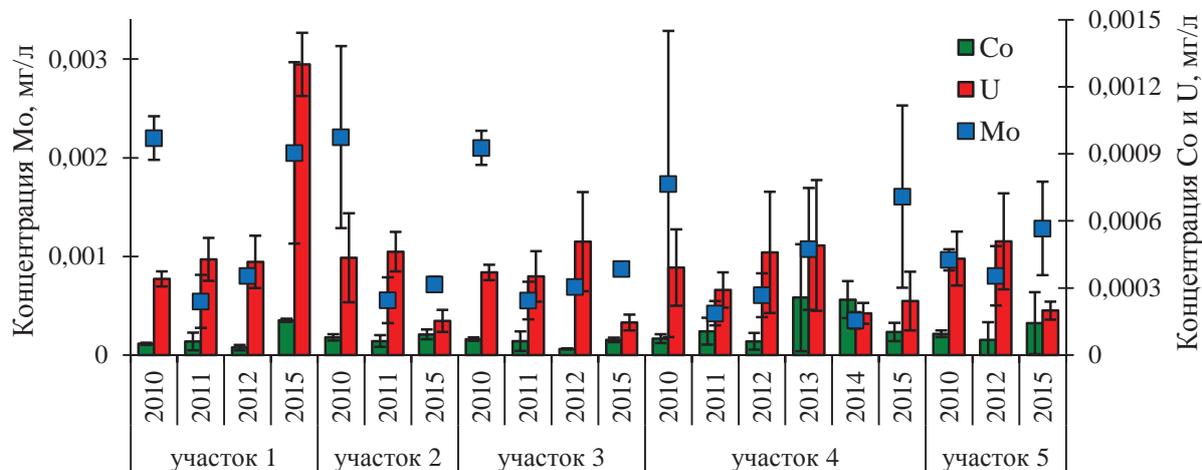


Рис. 7. Средние значения концентраций (мг/л) Mo, Co и U в пробах воды р. Енисей

Fig. 7. Average concentrations (mg/L) of Mo, Co and U in samples of the Yenisei River water

находятся в тех же диапазонах, что и значения, приведённые в [21] для р. Енисей, в 2007–2008 гг. На всех участках, за исключением участка У1 (п. Удачный), можно отметить тенденцию к снижению концентрации урана в воде р. Енисей в 2015 г., относительно предыдущих периодов.

Концентрация Pb, Cd и Bi в воде р. Енисей. Для речных вод характерны содержания свинца от десятых долей до единиц микрограммов в литре. Повышенные над фоновыми значениями концентрации свинца в природных водах обусловлены антропогенной нагрузкой. Значительный вклад в загрязнение объектов окружающей среды соединениями свинца, наряду с деятельностью химических и металлургических производств, оказывает сжигание углей и применение соединений свинца в моторных топливах [27]. Несмотря на то, что средние значения содержания Pb в воде р. Енисей не превышают нормативов (ПДК_в=0,01, ПДК_{рх}=0,006 мг/л), для некоторых отдельных точек отбора на участке У4 в 2010 и 2013 гг. обнаружены превышения (0,008; 0,010; 0,016; 0,021; 0,036 мг/л). В целом концентрации Pb в отдельных точках отбора изменяются в пределах 0...0,036 мг/л.

Различные соединения кадмия могут поступать в поверхностные воды со сточными водами свинцово-цинковых заводов, химических предприятий. Однако за счёт процессов сорбции концентрация растворенных соединений кадмия в воде понижается. Активно происходят процессы накопления кадмия водными организмами. Согласно [27] для речных незагрязнённых и слабозагрязнённых вод концентрации кадмия не превышают нанограммовых количеств. Обнаружено, что для воды р. Енисей концентрации Cd в большинстве точек отбора (преимущественно на участках У1–У3) были ниже предела обнаружения. Статистически достоверны более высокие значения кадмия на участках У4 и У5 (0,0001...0,0007 мг/л), которые в свою очередь не превышают нормативов [25, 26]. Содержание Bi по точкам отбора составило 0...0,0001 мг/л, что на 3 порядка ниже ПДК_в.

В период 2008–2012 гг. разными авторами проводились исследования качества воды на разных участках р. Енисей и её притоках. Так, в работе [16] было показано, что концентрации металлов и веществ в воде р. Енисей выше и ниже г. Красноярска в 2008–2009 гг. не превышают российских и зарубежных нормативов, за исключением Al и нефтепродуктов. В работе [17] представлены данные о содержании тяжёлых металлов (свинца, кадмия, ртути, цинка, меди) в воде р. Енисей и его правобережного притока р. Кан за 2008–2011 гг. В работах [15, 18] разными авторами проведено комплексное исследование эколого-геохимического состояния воды р. Ангара (правый приток р. Енисей) и её правобережного бассейна по содержанию тяжёлых металлов, углеводов, фенолов, пестицидов. Отмечено превышение установленных нормативов в воде р. Ангара по содержанию

железа, марганца, меди, цинка, нитритов, ионов аммония, фосфатов и органических веществ, фенолов, пестицидов, углеводов и показаны возможные причины их поступления в воду [18]. В работе [20] авторами в 2011–2012 гг. проведён мониторинг в нижнем течении р. Енисей. Обнаружены значительные превышения содержания токсичных органических соединений и тяжёлых металлов в водных объектах вблизи г. Игарки и оценена вероятность выноса загрязнений в акваторию р. Енисей [20].

Заключение

Таким образом, в результате проведённой работы установлены уровни концентраций 20 химических элементов в воде р. Енисей на участке от г. Красноярска до устья р. Ангара (п. Стрелка) за период с 2010 по 2015 гг. Показаны изменения средних значений концентраций элементов за 6-летний период (2010–2015) для пяти участков отбора. Полученные в настоящей работе данные отражают многолетние тенденции по загрязнению воды р. Енисей элементами Fe, Cu, Mn, Al, Zn и согласуются с ранее наблюдаемыми результатами других исследований по определению качества вод на различных географических участках (от истока до устья) р. Енисей и его притоков. Показано, что на исследуемом участке р. Енисей наиболее остро стоит проблема загрязнения воды Fe и Cu – за весь период наблюдения средние концентрации составляют 1...2 значений ПДК_{рх} для Fe (0,1 мг/л) и 1...5 значений ПДК_{рх} для Cu (0,001 мг/л). Для средних значений Mn характерны величины в 1...3 ПДК_{рх} (0,01 мг/л) для участков, удалённых более чем на 90 км ниже по течению от Красноярска (вблизи с. Атаманово и п. Стрелка). В 2015 г. средние концентрации Al составили 1...2 ПДК_{рх} (0,04 мг/л) на всех участках наблюдения; вблизи с. Атаманово такой же порядок значений обнаружен в 2011 и 2014 гг. Для Zn зарегистрированы средние значения 1...3 ПДК_{рх} (0,01 мг/л) в 2010–2011 гг. выше Красноярска (Удачный), вблизи с. Атаманово и п. Стрелка. Для отдельных точек отбора на участке вблизи с. Атаманово в 2010 и 2013 гг. обнаружены значения концентрации Pb 1...6 ПДК_{рх} (0,006 мг/л). Прослеживается некоторая тенденция к увеличению концентрации Cu, Fe, Zn в воде ниже по течению от Красноярска на 90 км, которая, вероятно, связана с расположением в этом районе промышленного комплекса г. Железногорска и с впадением в реку Енисей реки Кан, с расположенными на ней промышленными предприятиями, прежде всего в г. Зеленогорске. Однако для достоверного установления причин повышенного содержания указанных выше элементов в воде необходимо провести комплексное исследование качества вод притоков р. Енисей и проанализировать специфику сбросов сточных вод промышленных предприятий в бассейне р. Енисей в исследуемом районе и выше по течению от г. Красноярска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fifty-year sedimentary record of heavy metal pollution (Cd, Zn, Cu, Pb) in the Lot River reservoirs (France) / S. Audry, J. Schäfer, G. Blanc, J. M. Jouanneau // *Environmental Pollution*. – 2004. – № 132 (3). – P. 413–426.
2. Kumar R.N., Solanki R., Kumar J.I.N. Seasonal variation in heavy metal contamination in water and sediments of river Sabarmati and Kharicut canal at Ahmedabad, Gujarat // *Environmental monitoring and assessment*. – 2013. – № 185 (1). – P. 359–368.
3. Effect of pH and salinity on flocculation process of heavy metals during mixing of Aras River water with Caspian Sea water / A.R. Karbassi, M. Heidari, A.R. Vaezi, A.V. Samani, M. Fakhraee, F. Heidari // *Environmental earth sciences*. – 2014. – № 72 (2). – P. 457–465.
4. Assessment of heavy metals/metalloid (As, Pb, Cd, Ni, Zn, Cr, Cu, Mn) concentrations in edible fish species tissue in the Pearl River Delta (PRD), China / H.M. Leung, A.O.W. Leung, H.S. Wang, K.K. Ma, Y. Liang, K.C. Ho, K.K.L. Yung // *Marine pollution bulletin*. – 2014. – № 78 (1). – P. 235–245.
5. Nazeer S., Hashmi M.Z., Malik R.N. Heavy metals distribution, risk assessment and water quality characterization by water quality index of the River Soan, Pakistan // *Ecological Indicators*. – 2014. – № 43. – P. 262–270.
6. Mohamed E.H.A., Osman A.R. Heavy metals concentration in water, muscles and gills of *Oreochromis niloticus* collected from the sewage-treated water and the White Nile // *International Journal of Aquaculture*. – 2014. – № 4. – P. 36–42.
7. Heavy metal pollution in surface water and sediment: a preliminary assessment of an urban river in a developing country / M.S. Islam, M.K. Ahmed, M. Raknuzzaman, M. Habibullah-Al-Mamun, M.K. Islam // *Ecological Indicators*. – 2015. – № 48. – P. 282–291.
8. Assessment of heavy metal pollution in Red River surface sediments, Vietnam / T.T.H. Nguyen, W. Zhang, Z. Li, J. Li, C. Ge, J. Liu, L. Yu // *Marine Pollution Bulletin*. – 2016. – № 113 (2). – P. 513–519.
9. Abraham M.R., Susan T.B. Water contamination with heavy metals and trace elements from Kilembe copper mine and tailing sites in Western Uganda; implications for domestic water quality // *Chemosphere*. – 2017. – № 169. – P. 281–287.
10. Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник за 2013, 2014, 2015 годы с приложениями / под ред. член-корр. РАН А.М. Никанорова. – Ростов-на-Дону: ФГБУ «Гидрохимический Институт», 2014, 2015, 2016 гг. URL: <http://gidrohim.com/node/55> (дата обращения: 27.12.2016).
11. Kondrat'eva L.M., Andreeva D.V., Golubeva E.M. Influence of large tributaries on biogeochemical processes in the Amur river // *Geography and Natural Resources*. – 2013. – № 34 (2). – P. 129–136.
12. Курманова Л.Г., Кулагин А.Ю. Динамика содержания и распределения химических элементов в водах рек Башкирского Зауралья // *Вестник Удмуртского университета*. – 2012. – № 6–1. – С. 3–8.
13. Савичев О.Г. Региональные особенности химического состава речных вод Сибири и их учёт при нормировании сбросов сточных вод // *Вода: химия и экология*. – 2014. – № 1. – С. 41–46.
14. Savichev O.G., Matveenko I.A. Evaluation of chemical composition changes of surface water in Boguchan Reservoir (Siberia, Russia) // *Hydrological Sciences Journal*. – 2013. – № 58 (2). – P. 1–10.
15. Karnaukhova G.A. Water quality and protection: environmental aspects hydrochemistry of the Angara and Reservoirs of the Angara Cascade // *Water Resources*. – 2008. – № 35 (1). – P. 71–79.
16. Оценка антропогенного загрязнения р. Енисей по содержанию металлов в основных компонентах экосистемы на участках, расположенных выше и ниже г. Красноярска / О.В. Анищенко, М.И. Гладышев, Е.С. Кравчук, Г.С. Калачёва, И.В. Грибовская // *Журнал Сибирского Федерального Университета. Биология*. – 2010. – Т. 3. – № 1. – С. 82–98.
17. Колесников В.А., Бойченко Н.Б. Годовая и сезонная динамика содержания тяжёлых металлов в воде рек Енисей, Чулым, Кан Красноярского края // *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. – 2014. – № 5. – С. 142–147.
18. Савичев О.Г., Копылова Ю.Г., Хвощевская А.А. Эколого-геохимическое состояние реки Ангара и её притоков на участке от г. Усть-Илимска до с. Богучаны (Восточная Сибирь) // *Известия Томского политехнического университета*. – 2011. – Т. 318. – № 1. – С. 150–154.
19. Savichev O.G., Kolesnichenko L.G., Saifulina E.V. The ecogeochemical state of water bodies in the Taz-Yenisei interfluvium // *Geography and Nature Resources*. – 2011. – № 32 (4). – P. 333–336.
20. Химико-экологическое состояние района г. Игарка Красноярского края. / Л.Г. Бондарева, А.С. Жук, В.В. Сурякова, А.И. Рубайло, Н.И. Танаев, И.Г. Танаев // *Журнал Сибирского Федерального Университета. Химия*. – 2013. – Т. 6. – № 3. – С. 313–320.
21. First data on the uranium content in water of the Yenisei River basin in the area affected by the operation of Rosatom plants / A.Y. Bolsunovskii, A.G. Degermendzhi, A.M. Zhizhaev, A.I. Rubailo, A.I. Saprykin // *Doklady Earth Sciences*. – 2011. – № 439 (1). – P. 1010–1015.
22. Содержание тяжёлых металлов в донных отложениях реки Енисей в районе Красноярска / Д.В. Дементьев, А.Я. Болсуновский, Р.В. Борисов, Е.А. Трофимова // *Известия Томского политехнического университета*. – 2015. – Т. 326. – № 5. – С. 91–98.
23. Использование метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в элементном анализе объектов окружающей среды / В.К. Карандашев, А.Н. Туранов, Т.А. Орлова, А.Е. Лежнев, С.В. Носенко, Н.И. Золотарева, И.Р. Москвина // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2007. – Т. 73. – № 1. – С. 12–22.
24. Heavy metals and trace elements in muscle of silverside (*Odonesthes bonariensis*) and water from different environments (Argentina): aquatic pollution and consumption effect approach / E. Avigliano, N.F. Schenone, A.V. Volpedo, W. Goessler, A.F. Cirelli // *Science of the Total Environment*. – 2015. – № 506. – P. 102–108.
25. Перечень рыбохозяйственных нормативов: предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. – М.: ВНИРО, 1999. – 304 с.
26. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Гигиенические нормативы ГН 2.1.5.1315–03. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_43149/ (дата обращения: 27.12.2016).
27. Никаноров А.М. Справочник по гидрохимии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – 390 с.

Поступила 20.02.2017 г.

Информация об авторах

Дементьев Д.В., кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории радиоэкологии Института биофизики СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН.

Болсуновский А.Я., доктор биологических наук, заведующий лабораторией радиоэкологии Института биофизики СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН.

Борисов Р.В., кандидат химических наук, ведущий инженер лаборатории радиоэкологии Института биофизики СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН.; научный сотрудник ИХХТ СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН.

Александрова Ю.В., ведущий инженер лаборатории радиоэкологии Института биофизики СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН.

UDC 543.31:57.044(282.256.3)

CONCENTRATIONS OF METALS IN WATER OF THE YENISEI RIVER BETWEEN KRASNOYARSK AND THE ANGARA RIVER OUTFALL IN 2010–2015

Dmitry V. Dementyev¹,

dementyev@gmail.com

Alexander Ya. Bolsunovsky¹,

radecol@ibp.ru

Roman V. Borisov^{1,2},

roma_boris@list.ru

Yuliyana V. Alexandrova¹,

yuliyana_aleksandrova@mail.ru

¹ Institute of Biophysics Siberian Branch Russian Academy of Sciences FRC KSC SB RAS, 50/50 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia.

² ICCT SB RAS FRC KSC SB RAS, 50/24 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia.

The relevance of the study is determined by the necessity to obtain the data on concentrations of chemical elements in water of the Yenisei River, which is continuously affected by human activities.

The aim of the study is to determine concentrations of such chemical elements as Na, K, Ca, Mg, Zn, Cu, Ba, Al, Mn, U, Mo, Cr, Ni, As, Co, Sr, Fe, Pb, Cd, and Bi in water of the Yenisei River between the city of Krasnoyarsk and the outfall of the Angara River.

The methods used in the study. Total contents of the elements were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry, using an Agilent 7500a instrument.

The results. The study showed the changes in average concentrations of 20 chemical elements in water of the Yenisei River between the city of Krasnoyarsk and the outfall of the Angara River (the village Strelka), for 2010–2015. Comparison of the data obtained with the levels of maximum permissible concentrations showed that the examined part of the Yenisei River contained the increased concentrations of Fe, Cu, Mn, Al, and Zn. For the study period, the magnitudes of average concentrations of Fe reached 1...2 maximum permissible concentrations (MPC) and Cu concentrations reached 1...5 MPC. The average concentrations of Mn amounted to 1...3 MPC in the parts of the river over 90 km downstream of Krasnoyarsk (at the villages Atamanovo and Strelka). Cu, Fe, and Zn concentrations tend to increase somewhat in the parts of the river over 90 km downstream of Krasnoyarsk, which may be caused by the influence of the industrial complex of the town Zheleznogorsk and the outfall of the Kan River, with the large industrial facilities located along its banks, in Zelenogorsk, in particular.

Key words:

Water, heavy metals, microelements, screening, the Yenisei River, water quality.

REFERENCES

1. Audry S., Schäfer J., Blanc G., Jouanneau J. M. Fifty-year sedimentary record of heavy metal pollution (Cd, Zn, Cu, Pb) in the Lot River reservoirs (France). *Environmental Pollution*, 2004, no. 132 (3), pp. 413–426.
2. Kumar R.N., Solanki R., Kumar J.I.N. Seasonal variation in heavy metal contamination in water and sediments of river Sabarmati and Kharicut canal at Ahmedabad, Gujarat. *Environmental monitoring and assessment*, 2013, no. 185 (1), pp. 359–368.
3. Karbassi A.R., Heidari M., Vaezi A.R., Samani A.V., Fakhraee M., Heidari F. Effect of pH and salinity on flocculation process of heavy metals during mixing of Aras River water with Caspian Sea water. *Environmental earth sciences*, 2014, no. 72 (2), pp. 457–465.
4. Leung H.M., Leung A.O.W., Wang H.S., Ma K.K., Liang Y., Ho K.C., Yung K.K.L. Assessment of heavy metals/metalloid (As, Pb, Cd, Ni, Zn, Cr, Cu, Mn) concentrations in edible fish species tissue in the Pearl River Delta (PRD), China. *Marine pollution bulletin*, 2014, no. 78 (1), pp. 235–245.
5. Nazeer S., Hashmi M.Z., Malik R.N. Heavy metals distribution, risk assessment and water quality characterization by water quality index of the River Soan, Pakistan. *Ecological Indicators*, 2014, no. 43, pp. 262–270.
6. Mohamed E.H.A., Osman A.R. Heavy metals concentration in water, muscles and gills of *Oreochromis niloticus* collected from the sewage-treated water and the White Nile. *International Journal of Aquaculture*, 2014, no. 4, pp. 36–42.
7. Islam M.S., Ahmed M.K., Raknuzzaman M., Habibullah-Al-Mamun M., Islam M.K. Heavy metal pollution in surface water and sediment: A preliminary assessment of an urban river in a developing country. *Ecological Indicators*, 2015, no. 48, pp. 282–291.
8. Nguyen T.T.H., Zhang W., Li Z., Li J., Ge C., Liu J., Yu L. Assessment of heavy metal pollution in Red River surface sediments, Vietnam. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, no. 113 (2), pp. 513–519.
9. Abraham M.R., Susan T.B. Water contamination with heavy metals and trace elements from Kilembe copper mine and tailing sites in Western Uganda; implications for domestic water quality. *Chemosphere*, 2017, no. 169, pp. 281–287.
10. *Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiiskoy Federatsii. Ezhegodnik za 2013, 2014, 2015 gody s prilozheniyami* [Quality of surface waters of the Russian Federation. Yearbook for 2013, 2014 and 2015 with applications]. Ed. by A.M. Nikanorov. Rostov-na-Donu, FGBU Hidrokhimichesky Institut Press, 2014, 2015, 2016. Available at: <http://gidrohim.com/node/55> (accessed 27 December 2016).

11. Kondrat'eva L.M., Andreeva D.V., Golubeva E.M. Influence of large tributaries on biogeochemical processes in the Amur river. *Geography and Natural Resources*, 2013, vol. 34, no. 2, pp. 129–136.
12. Kurmanova L.G., Kulagin A.Yu. Dynamics of content and distribution of chemical elements in waters of the rivers of the Bashkir Trans-Urals. *Vestnik Udmurtskogo universiteta*, 2012, no. 6–1, pp. 3–8. In Rus.
13. Savichev O.G. Regional features of chemical composition of river waters of Siberia and their consideration at rationing wastewater discharges. *Voda: khimiia i ekologiya*, 2014, no. 1, pp. 41–46. In Rus.
14. Savichev O.G., Matveenko I.A. Evaluation of chemical composition changes of surface water in Boguchan Reservoir (Siberia, Russia). *Hydrological Sciences Journal*, 2013, vol. 5, no. 2, pp. 1–10.
15. Karnaukhova G.A. Water quality and protection: environmental aspects hydrochemistry of the Angara and Reservoirs of the Angara Cascade. *Water Resource*, 2008, vol. 35, no. 1, pp. 71–79.
16. Anishchenko O.V., Gladyshev M.I., Kravchuk E.S., Kalacheva G.S., Gribovskaia I.V. Assessment of the Yenisei River anthropogenic pollution by metals concentrations in the main ecosystem compartments upstream and downstream Krasnoyarsk city (Russia). *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 2010, no. 1, pp. 82–98. In Rus.
17. Kolesnikov V.A., Boichenko N.B. Annual and seasonal dynamics of heavy metal content in water of the Krasnoyarsk territory rivers Yenisei, Chulyum, Kan. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2014, no. 5, pp. 142–147. In Rus.
18. Savichev O.G., Kopylova Yu.G., Khvashchenskaya A.A. Ecological and geochemical state of the Angara River and its tributaries in the area from the city of Ust-Ilimsk down to Boguchany (Eastern Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 1, pp. 150–154. In Rus.
19. Savichev O.G., Kolesnichenko L.G., Saifulina E.V. The ecologo-geochemical state of water bodies in the Taz-Yenisei interfluves. *Geography and Nature Resources*, 2011, vol. 32, no. 4, pp. 333–336.
20. Bondareva L.G., Zhuk A.S., Sursiakova V.V., Rubailo A.I., Tananaev N.I., Tananaev I.G. Chemical and ecological status of the district Igarka Krasnoyarsk territory. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*, 2013, vol. 6, no. 3, pp. 313–320. In Rus.
21. Bolsunovskii A.Y., Degermendzhi A.G., Zhizhaev A.M., Rubailo A.I., Saprykin A.I. First data on the uranium content in water of the Yenisei River basin in the area affected by the operation of Rosatom plants. *Doklady Earth Sciences*, 2011, vol. 439, no. 1, pp. 1010–1015.
22. Dementev D.V., Bolsunovsky A.Ya., Borisov R.V., Trofimova E.A. Concentrations of heavy metals in bottom sediments of the Yenisei river in the city of Krasnoyarsk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 5, pp. 91–98. In Rus.
23. Karandashev V.K., Turanov A.N., Orlova T.A., Lezhnev A.E., Nosenko S.V., Zolotareva N.I., Moskvina I.R. Use of mass spectrometry with inductively coupled plasma method for element analysis of surrounding medium objects. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2007, vol. 73, no. 1, pp. 12–22. In Rus.
24. Avigliano E., Schenone N.F., Volpedo A.V., Goessler W., Cirelli A.F. Heavy metals and trace elements in muscle of silverside (*Odontesthes bonariensis*) and water from different environments (Argentina): aquatic pollution and consumption effect approach. *Science of the Total Environment*, 2015, no. 506, pp. 102–108.
25. *Perechen rybkhozhaystvennykh normativov: predelno dopustimyykh kontsentratsiy (PDK) i orientirovochno bezopasnykh urovnay vozdeystviya (OBUV) vrednykh veshchestv dlya vody vodnykh obektov, imeyushchikh rybkhozhaystvennoe znachenie* [The list of fishery regulations: maximum permissible concentration and exposure limits of pollutants to the water of water bodies of fishery significance]. Moscow, VNIRO Publ., 1999. 304 p.
26. *Predelno dopustimye kontsentratsiy (PDK) khimicheskikh veshchestv v vode vodnykh obektov khozyaystvenno-pitevogo i kulturno-bytovogo vodopolzovaniya Gigienicheskie normativy GN 2.1.5.1315–03* [Maximum permissible concentration of chemicals in water of drinking and cultural water bodies and community water use. Hygienic standards GN 2.1.5.1315–03]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_43149/ (accessed: 27 December 2016).
27. Nikanorov A.M. *Spravochnik po gidrokhimii* [Handbook on hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989. 390 p.

Received: 20 February 2017.

Information about the authors

Dmitry V. Dementyev, Cand. Sc., research associate, Radioecology Laboratory, Institute of Biophysics Siberian Branch Russian Academy of Sciences FRC KSC SB RAS.

Alexander Ya. Bolsunovskiy, Dr. Sc., head of Radioecology Laboratory, Institute of Biophysics Siberian Branch Russian Academy of Sciences FRC KSC SB RAS.

Roman V. Borisov, Cand. Sc., engineer, Radioecology Laboratory, Institute of Biophysics Siberian Branch Russian Academy of Sciences; research associate, ICCT SB RAS FRC KSC SB RAS.

Yuliyana V. Alexandrova, engineer, Radioecology Laboratory, Institute of Biophysics Siberian Branch Russian Academy of Sciences FRC KSC SB RAS.

УДК 621.833.2(31)

РАСЧЕТ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ ПОЛУОБКАТНОЙ ПЛОСКОКОНИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ ПРИВодОВ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ

Сызранцев Владимир Николаевич¹,

v_syzrantsev@mail.ru

Пазяк Андрей Александрович²,

a.a.pazyak@gmail.com

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

Актуальность работы. Современные приводы запорной арматуры, основанные на использовании червячных и спироидных передач, имеют крайне низкий к.п.д. (порядка 0,3), при кратковременном режиме работы имеют высокий страгивающий момент, что приводит к необходимости использования электроприводов повышенной мощности, а при внедрении передач в условиях Крайнего Севера систем дистанционного управления запорной арматуры к выходу из строя электродвигателей в связи с их отказами вследствие «прихватов» как шаровых кранов, так и червячных или спироидных передач. Обеспечить требуемую работоспособность и надежность работы запорной арматуры в отечественных условиях эксплуатации позволяют приводы, разработанные на основе плоскоконических прецессирующих передач. К настоящему времени для этих передач построены математические модели процессов формообразования зубьев колес, исследована геометрия их контактирования в зацеплении. Показано, что с позиций технологического обеспечения процессов изготовления зубьев колес передач, обеспечения требуемых геометро-кинематических характеристик контакта, наиболее эффективными являются полуобкатные плоскоконические передачи с продольной модификацией поверхности зубьев колеса. В то же время для реализации процесса проектирования плоскоконических передач необходимо уметь определять их нагрузочную способность по критерию обеспечения контактной прочности. Принципиальной сложностью решения данной задачи является наличие в зацеплении плоскоконической передачи нескольких пар зубьев, число которых зависит от геометрии поверхностей зубьев, величины передаваемого крутящего момента, изгибной и контактной податливости зубьев в зацеплении.

Цель исследования: разработка методики расчета несущей способности передачи по величине передаваемого крутящего момента из условия обеспечения контактной прочности при известной геометрии зубьев колеса и шестерни полуобкатной плоскоконической передачи, заданных механических характеристиках материала колес.

Методы исследования: теория пространственных передач зацеплением, методы строительной механики раскрытия статической неопределимости систем с односторонними связями, численные методы решения систем трансцендентных уравнений.

Результаты. Для проектирования приводов запорной арматуры нефтегазопроводов на основе полуобкатных плоскоконических передач разработана методика их проверочного расчета на контактную прочность при заданной величине крутящего момента. Методика проиллюстрирована на примере расчета нагрузочной способности соосного редуктора с передаточным отношением 65 привода шарового крана ДУ-300.

Ключевые слова:

Полуобкатная плоскоконическая передача, локализованный контакт, многопарный контакт, контактные напряжения, нагрузочная способность.

Введение

В настоящее время как в отечественном, так и зарубежном арматуростроении практически все ручные приводы запорной арматуры изготавливаются на основе червячных передач [1, 2], определение оптимальных геометрических параметров которых, методики проектного и проверочного расчета, технологические процессы изготовления червяка и колеса за десятки лет отработаны с исчерпывающей полнотой. Несмотря на высокое передаточное отношение, в целом неплохие конструктивные компоновки, приводы на основе червячных передач имеют ряд недостатков: высокая стоимость вследствие использования при изготовлении червячного колеса цветных металлов (бронз), низкий к.п.д. (для однозаходных передач порядка 30 %), высокие массогабаритные характеристики. При эксплуатации таких приводов в условиях низких температур при крайне редких включениях передачи имеют высокий страгивающий момент, что не позволяет осуществить эк-

стренное перекрытие трубопровода, то есть обеспечить надежную его работу в целом.

Известны различные подходы к совершенствованию приводов запорной арматуры путем замены червячной передачи на глобоидную [3] или на спироидную [4]. Технология изготовления глобоидных передач существенно более сложная, нежели червячных. В связи с чем, несмотря на более высокую нагрузочную способность глобоидных передач при одинаковых с червячной передачей межосевых расстояниях, приводы запорной арматуры на базе передач глобоидных изготавливаются редко. В суровых условиях эксплуатации им присущи те же недостатки, что и приводам, содержащим червячную передачу.

Значительный прорыв в создании эффективных приводов запорной арматуры достигнут вследствие использования в них спироидных передач [4–9]. Эти приводы по сравнению с приводами на основе червячной передачи имеют более высокие массогабаритные характеристики, их удачная

пространственная компоновка позволяет реализовать процесс конструирования привода на основе сборки из отдельных модулей в зависимости от требуемого передаточного отношения. Помимо широких возможностей управления геометрическими характеристиками контакта в зацеплении зубьев спироидной передачи, благодаря проведенным исследованиям [4], оба элемента передачи – червяк и колесо – могут быть выполнены стальными, что существенно снижает стоимость приводов. Тем не менее, поскольку в спироидных передачах скорость относительного скольжения поверхностей червяка и зубьев колеса весьма высока, общий к.п.д. передачи сопоставим с передачей червячной, как и страгивающий момент при эксплуатации приводов в условиях Крайнего Севера.

Принципиально иное направление совершенствования ручных приводов запорной арматуры рассмотрено в работах [10–12]. С целью значительного повышения к.п.д. привода в целом (до 90 %) и перехода от скольжения поверхностей зубьев к их обкатыванию друг по другу предложено приводы создавать на базе использования плоскоконической прецессирующей передачи (ПКП) [10]. Основой таких приводов является соосный редуктор [13], кинематическая схема которого представлена на рис. 1.

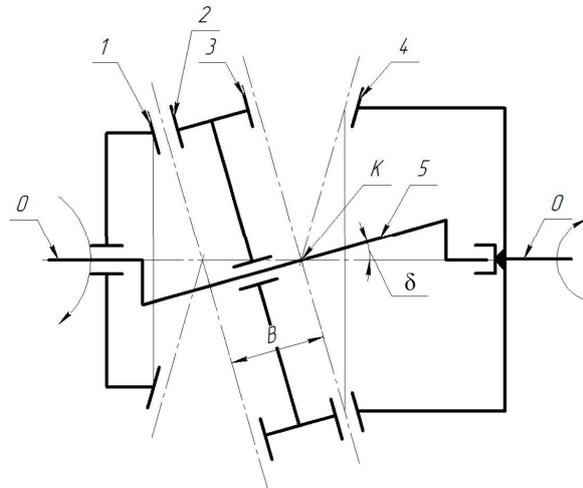


Рис. 1. Схема соосного редуктора на основе плоскоконической прецессирующей передачи

Fig. 1. Designed scheme of coaxial gearbox based on precessional bevel gears with a small shaft angle with a non-generated gear and a generated pinion

Основными элементами редуктора являются: шестерня – 1 с конической начальной поверхностью; колесо – 2, имеющее два разнесенных на величину B зубчатых венца – 2 и 3, начальные поверхности которых представляют собой плоскость; подвижная шестерня – 4 с конической начальной поверхностью; водило – 5, имеющее эксцентричный участок вала, расположенный под углом δ ($\delta=2^\circ \dots 5^\circ$) к общей оси соосного редуктора $O-O$. Во время работы редуктора шестерня – 1 неподвижна, колесо – 2 совершает сложное движение – вра-

щение вокруг своей оси и вместе с водилом – 5 вокруг оси $O-O$. Вершины начального конуса шестерни – 1 и начального конуса зубчатого венца – 2 (угол конуса 90°) не совпадают. Для исключения планетарного движения звеньев в наиболее нагруженной (тихоходной) плоскоконической передаче (зубчатой муфте), составленной из колес с зубчатыми венцами – 3 и 4, необходимо, чтобы вершина начального конуса зубчатого венца – 4, вершина начального конуса зубчатого венца – 3 (угол конуса 90°) не только совпадали, но и находились в точке пересечения оси эксцентричного участка вала и оси редуктора $O-O$. Выполнение этого условия соответствует только одному значению величины B , рассчитываемому по зависимости:

$$B = \frac{m_n}{2} \left(\frac{z_2^*}{\operatorname{tg} \delta} - \frac{z_1^*}{\sin \delta} \right), \quad (1)$$

где m_n – нормальный модуль плоскоконической передачи; z_1^* – число зубьев шестерни – 1; z_2^* – число зубьев колеса – 2 (зубчатого венца 2); δ – угол прецессии.

Зубчатая муфта, плоскоконическая передача соосного редуктора, составленная из колес с зубчатыми венцами – 3 и 4, выполняется с числом зубьев $z_3^*=z_4^*$ и имеет передаточное отношение, равное единице.

На базе соосного редуктора (рис. 1) разработаны различные конструкции ручных приводов шаровых кранов (рис. 2).

Плоскоконическая передача может изготавливаться в различных вариантах исполнения [10–12, 14]: обкатном с прямыми зубьями, полуобкатном с двояковыпукловогнутыми зубьями, продольной модификацией зубьев. Последний вариант ПКП по применяемым инструментам и оборудованию (используются универсальные фрезерные станки с ЧПУ), отсутствию ограничений на геометрические параметры колес, вызываемые процессом формообразования их зубьев, требованиям к квалификации зуборезчика, трудоемкости и себестоимости процесса изготовления элементов ПКП имеет неоспоримые преимущества. Геометрия полуобкатной ПКП с продольной (бочкообразной) модификацией зубьев рассмотрена в работе [14]. Для получения этой модификации, в отличие от процесса нарезания прямого зуба колеса, инструмент с прямолинейной режущей кромкой помимо движения, задаваемого параметром u , параллельно проекции конуса впадин зуба одновременно в направлении оси вращения колеса, перемещается на некоторую величину, определяемую функцией $\Delta_u(u)$. В расчетной точке P зуба колеса эта функция (при $u=0$) равна нулю, а при изменении параметра u как в сторону положительных, так и отрицательных значений функция $\Delta_u(u)$ плавно возрастает. Функция $\Delta_u(u)$ представляет собой отклонения эллипса, касающегося в расчетной точке P , от прямой, проходящей через эту точку, и зависит от параметров: a_u, b_u – малая и большая по-



Рис. 2. Приводы к шаровым кранам: а) шаровый кран и привод над землей, б) шаровый кран на глубине, привод надземный; в) шаровый кран и привод на глубине (входной вал расположен вертикально)

Fig. 2. Ball valve drives: a) ball valve and drive above the ground; b) ball valve at depth, drive above ground; c) ball valve and drive at depth (input shaft is located vertically)

луоиси эллипса; ϑ_{up} – угол, нулевое значение которого обеспечивает симметричный вид зависимости $\Delta_u(|u|)$, а при $\vartheta_{up} \neq 0$ зависимость $\Delta_u(u)$ становится несимметричной относительно $u=0$.

В результате исследования процессов формообразования поверхностей зубьев колеса и шестерни ПКП и геометрических характеристик ее зацепления в работе [14] получены конечные зависимости проекций координат x_1, y_1, z_1 радиуса-вектора \vec{r}_1 поверхности зуба шестерни и проекций координат m_{1x}, m_{1y}, m_{1z} ее орта нормали \vec{m}_1 в системе координат $S_1(x_1, y_1, z_1)$, жестко с ней связанной с шестерней:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_1(u_1, h_1, \varphi_1, V_1); & m_{1x} &= m_{1x}(u_1, h_1, \varphi_1, V_1); \\ y_1 &= y_1(u_1, h_1, \varphi_1, V_1); & m_{1y} &= m_{1y}(u_1, h_1, \varphi_1, V_1); \\ z_1 &= z_1(u_1, h_1, \varphi_1, V_1); & m_{1z} &= m_{1z}(u_1, h_1, \varphi_1, V_1); \\ & & f_1(u_1, h_1, \varphi_1, V_1) &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

и проекции координат x_2, y_2, z_2 радиуса-вектора \vec{r}_2 поверхности бочкообразного зуба колеса и проекции m_{2x}, m_{2y}, m_{2z} ее орта нормали \vec{m}_2 в системе координат $S_2(x_2, y_2, z_2)$ жестко связанной с колесом:

$$\begin{aligned} x_2 &= x_2(u_2, h_2, V_2); & m_{2x} &= m_{2x}(u_2, h_2, V_2); \\ y_2 &= y_2(u_2, h_2, V_2); & m_{2y} &= m_{2y}(u_2, h_2, V_2); \\ z_2 &= z_2(u_2, h_2, V_2); & m_{2z} &= m_{2z}(u_2, h_2, V_2). \end{aligned} \quad (3)$$

В выражениях (2), (3) обозначено: $V_1\{\Sigma, \alpha_n, \theta_{f2}, r_1, r_2, i\}$ – вектор параметров шестерни; $V_2\{\alpha_n, \theta_{f2}, r_2, a_u, b_u, \vartheta_{up}\}$ – вектор параметров колеса; u_1, h_1 – линейные координаты поверхности зуба шестерни по длине и по профилю зуба; r_1 – средний делительный радиус шестерни; Σ – межосевой угол в передаче ($\delta=2^\circ \dots 5^\circ$); $\varphi_1=i\varphi_2$ – угол поворота шестерни в станочном зацеплении; $i=z_2^*/z_1^*$ – передаточное отношение ПКП; z_1^*, z_2^* – числа зубьев шестерни и колеса; φ_2 – угол поворота колеса в станочном зацеплении; u_2, h_2 – линейные координаты поверхности зуба колеса по длине и по профилю зуба; θ_{f2} – угол ножки зуба колеса; r_2 – средний де-

лительный радиус колеса; α_n – угол профиля исходного производящего контура; последним в выражениях (2) записано уравнение связи параметров – уравнение зацепления [14–16].

Знание геометрии поверхностей зубьев шестерни и колеса, с учетом выполнения условия (1), необходимо для получения требуемой информации для расчета нагруженности многопарного контакта исследуемой ПКП.

Разработка методики расчета нагрузочной способности полуобкатной плоскоконической передачи с локализованным контактом

Рассматриваемая полуобкатная ПКП с локализованным контактом зубьев в зацеплении относится к передачам с приближенным зацеплением [5, 15–18]. Ее отличительная особенность заключается в том, что поверхности зубьев пар, соседних с контактирующей парой, в любой фазе зацепления расположены достаточно близко, и с приложением к передаче внешнего крутящего момента реализуется многопарное зацепление. С позиций механики, данная передача является упругой системой с односторонними упругими связями (зубьями), поскольку эти связи воспринимают нагрузку лишь одного знака (контактирующие поверхности зубьев только сжимаются). Более того, ПКП представляет собой систему с изменяемой структурой, поскольку с изменением величины передаваемого крутящего момента изменяется число связей, воспринимающих этот крутящий момент в секторе нагруженных пар зубьев.

Определение нагруженности многопарного зацепления представляет собой задачу раскрытия статической неопределенности системы с односторонними связями [19–21], в процессе решения которой устанавливается число контактирующих пар, воспринимающих заданную нагрузку (крутящий момент) и характер распределения ее по этим парам.

Задача расчета распределенной нагрузки между контактирующими парами зубьев плоскоконической передачи формулируется следующим образом. В ненагруженном состоянии между зубьями колеса и шестерни имеются зазоры δS_i , причем для $i=1$ зазор δS_i минимален. После приложения крутящего момента T_1 к шестерне, имеющей число зубьев z_1^* , в контакт вступит n -я пара зубьев из z_1^* . Требуется найти число пар зубьев n , воспринимающих заданный крутящий момент T_1 , и определить характер распределения T_1 между парами зубьев плоскоконической передачи, для чего необходимо решить систему двух уравнений, одно из которых является уравнением равновесия, а второе – уравнение совместности деформаций и перемещений [3, 21]:

$$\sum_{i=1}^n P_i R_i \cos \alpha_n = T_1; W_i = \Delta - S_i; i = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Здесь: P_i , R_i – нормальная сила и радиус ее действия на i -й паре зубьев шестерни; S_i – зазор между поверхностями в i -й паре зубьев, рассчитываемый по выражению: $S_i = \delta S_i - \delta S_1$ (отметим, что зазор на первой паре δS_1 «выбирается» без какого-либо деформирования зубьев, путем поворота шестерни вокруг оси вращения); Δ – сближение зубчатых колес, являющееся мерой упругого деформирования зубчатой передачи; W_i – деформация i -й пары зубьев.

Следуя работам [3, 19–21], для передач с пространственным зацеплением зубьев деформацию W_i , в зависимости от нагрузки P_i , действующей по нормали к контактирующим поверхностям, представим в виде двухчленной зависимости:

$$W_i = a_i P_i + b_i P_i^m, \quad (5)$$

где a_i – податливость i -й пары зубьев, вызываемая их изгибом; b_i – коэффициент, характеризующий контактную податливость i -й пары зубьев; $m=2/3$ – показатель степени зависимости, полученной Герцем для расчета сближения упругих тел в случае их точечного начального касания.

При касании первой пары зубьев $S_1=0$, поэтому из (4) следует, что $\Delta=W_1$. Запишем далее уравнение совместности деформаций и перемещений для i -й и n -й пары зубьев:

$$W_i - W_n = S_n - S_i, i = \overline{1, n}. \quad (6)$$

Пусть при крутящем моменте T_1 в контакт вступила n -я пара зубьев, но нагрузку эта пара еще не воспринимает, в этом случае $W_n=0$. Определим зазор S_i в i -й паре в виде $S_i=S_0 \cdot F_i$, где S_0 , F_i – соответственно, амплитуда и функция зазоров между зубьями, зависящие от геометрических особенностей исследуемой передачи. С учетом изложенного преобразования выражения (6), второе уравнение системы (4) принимает вид:

$$P_i = \left(\frac{S_0}{b_i} \right)^{3/2} \left[(F_n - F_i) - \frac{a_i}{S_0} P_i \right]^{3/2}. \quad (7)$$

Решение данного трансцендентного уравнения при фиксированных значениях n относительно P_i

позволяет определить величину нагрузки, воспринимаемой каждой контактирующей парой зубьев, и по первому из уравнений системы (4) рассчитать величину передаваемого крутящего момента T_1 .

После определения усилий P_i величина напряжений (σ_{Hi}), возникающих в контакте каждой i -й пары зубьев, рассчитывается на основе зависимостей, полученных в работе [20]:

$$\sigma_{Hi} = n_\sigma [(E / \rho_{np i}^{(1)})^2 P_i]^{1/3}; \\ n_\sigma = 0,388 (\rho_{np i}^{(1)} / \rho_{np i}^{(2)})^{\alpha_\sigma}. \quad (8)$$

Здесь $\alpha_\sigma=0,333-0,097(1-\rho_{np i}^{(1)}/\rho_{np i}^{(2)})^4$; E – модуль упругости материала колес; $\rho_{np i}^{(1)}$ и $\rho_{np i}^{(2)}$ – главные приведенные радиусы кривизны, соответственно, в профильном и продольном направлении линии зуба, в точке контакта поверхностей i -й пары зубьев шестерни и колеса.

Если на основании исследования геометрии контакта зубьев в ПКП определена приведенная кривизна по длине зуба (K_2) и приведенная кривизна по профилю зуба (K_1), то для i -й контактирующей пары зубьев имеем $\rho_{np i}^{(1)}=1/K_1$ и $\rho_{np i}^{(2)}=1/K_2$. В результате преобразуем формулы (8) к виду:

$$\sigma_{Hi} = n_\sigma [(EK_{ii})^2 P_i]^{1/3}; n_\sigma = 0,388 (K_2 / K_1)^{\alpha_\sigma}; \\ \alpha_\sigma = 0,333 - 0,097 (1 - K_2 / K_1)^4. \quad (9)$$

Помимо зависимости (9) для построения методики определения нагрузочной способности полуобкатной ПКП с локализованным по длине контактом далее потребуются выражения для расчета коэффициента контактной податливости (b_i), полудлины (l_b) и полуширины (l_a) площадки контакта, полученные на основе решения задачи о контакте двух упругих тел с конечным радиусом кривизны в двух направлениях. На основании результатов работы [20] представим выражения для расчета величин b_i , l_b и l_a в виде:

$$b_i = n_\delta [(1/E)^2 K_{ii}]^{1/3}, n_\delta = 1,231 (K_2 / K_1)^{\alpha_\delta}; \\ \alpha_\delta = 0,167 + 0,080 (1 - K_2 / K_1)^4; \quad (10)$$

$$l_{bi} = n_b [P_i / (EK_{ii})]^{1/3}, n_b = 1,109 (K_2 / K_1)^{\alpha_b}; \\ \alpha_b = 0,167 - 0,061 (1 - K_2 / K_1)^4; \quad (11)$$

$$l_{ai} = n_a [P_i / (EK_{ii})]^{1/3}, n_a^{-1} = 0,901 (K_2 / K_1)^{\alpha_a}; \\ \alpha_a^{-1} = 0,500 - 0,031 (1 - K_2 / K_1)^4. \quad (12)$$

Отметим два обстоятельства, имеющих принципиальное значение при решении задачи раскрытия статической неопределенности системы (4) для исследуемой передачи. Первое связано с определением числа пар зубьев в передаче, участвующих в передаче крутящего момента T_1 . Для этого необходимо иметь функцию изменения величины минимальных зазоров в зубчатых парах, соседних с контактирующей. Несмотря на то, что число таких пар можно задавать любым (в предельном случае равным числу зубьев шестерни), участвовать в работе передачи будут только те пары зубьев шестер-

ни и колеса, точки касания которых будут в пределах фактических поверхностей зубьев, независимо от того, при каком крутящем моменте работает передача. Для определения предельного числа этих пар перед решением задачи о нагруженности зацепления полуобкатной ПКП необходимо провести исследование ее рабочего зацепления [10, 14].

Второе обстоятельство касается величины максимального усилия $P_{\max}=P_i$, передаваемого наиболее нагруженной парой зубьев. Под действием этого усилия в зацеплении зубьев шестерни и колеса возникает эллиптическая площадка контакта, размеры которой в продольном направлении зуба не могут превышать его ширины b_w . В результате, учитывая (11), имеем условие:

$$b_w = 2l_{bi} = 2n_b [P_{\max} / (EK_{ii})]^{1/3}, \quad (13)$$

где

$$n_b = 1,109(K_{2i} / K_{1i})^{\alpha_b};$$

$$\alpha_b = 0,167 - 0,061(1 - K_{2i} / K_{1i})^4.$$

С другой стороны, если материал и его термообработка элементов зубчатой передачи (зубьев шестерни и колеса) заданы, то легко рассчитать [22] величину допускаемых контактных напряжений $[\sigma_H]$. В этом случае, воспользовавшись выражениями (9), запишем:

$$[\sigma_H] = n_{\sigma} [(EK_{ii})^2 P_{\max}]^{1/3}, \quad (14)$$

где

$$n_{\sigma} = 0,388(K_{2i} / K_{1i})^{\alpha_{\sigma}};$$

$$\alpha_{\sigma} = 0,333 - 0,097(1 - K_{2i} / K_{1i})^4.$$

Объединяя (13) и (14), получим следующую систему уравнений:

$$b_w = 2l_{bi} = 2n_b [P_{\max} / (EK_{ii})]^{1/3},$$

$$[\sigma_H] = n_{\sigma} [(EK_{ii})^2 P_{\max}]^{1/3}, \quad (15)$$

где

$$n_b = 1,109(K_{2i} / K_{1i})^{\alpha_b};$$

$$\alpha_b = 0,167 - 0,061(1 - K_{2i} / K_{1i})^4;$$

$$n_{\sigma} = 0,388(K_{2i} / K_{1i})^{\alpha_{\sigma}};$$

$$\alpha_{\sigma} = 0,333 - 0,097(1 - K_{2i} / K_{1i})^4.$$

Если геометрия передачи известна (значения K_1 и K_2 определены, например, для расчетной точки), то P_{\max} может быть рассчитана как на основе условия (13), так и на базе (14). Естественно, в дальнейшем, при оценке нагрузочной способности передачи, необходимо использовать величину P_{\max} меньшую из двух рассчитанных. В то же время в общем случае система (15) имеет два неизвестных параметра: P_{\max} и K_2 , который, в свою очередь, зависит от параметров продольной модификации зуба колеса (3): \mathcal{Q}_{up} , a_u и b_u . Несложными преобразованиями система (15) сводится к одному уравнению:

$$b_w / 2 - f(K_1, K_2)[\sigma_H] / (EK_1) = 0, \quad (16)$$

где функция имеет вид:

$$f(K_1, K_2) = 2,918(K_2 / K_1)^{\alpha_f}. \quad (17)$$

Здесь обозначено: $\alpha_f = -0,166 + 0,036(1 - K_2 / K_1)^4$.

При известной из геометрического исследования полуобкатной ПКП величине приведенной кривизны в профильном направлении зуба (K_1) уравнение (16), учитывая (17), содержит лишь одно неизвестное – K_2 . Поскольку уравнение (16) является относительно K_2 трансцендентным, для его решения необходимо использовать численные методы.

Определенная в результате решения уравнения (16) величина K_2 на основе имеющегося выражения по его расчету (будет приведено далее) позволяет подобрать соответствующие значения \mathcal{Q}_{up} , a_u и b_u , то есть осуществить синтез продольной модификации поверхности зуба исходя из обеспечения предельной величины контактного напряжения и использования для передачи нагрузки всей активной поверхности зуба.

Зная K_1 и K_2 , максимальное усилие (P_{\max}), воспринимаемое наиболее нагруженной парой зубьев передачи, на основе (15) рассчитывается по формуле:

$$P_{\max} = \frac{1}{(EK_1)^2} \left(\frac{[\sigma_H]}{0,388(K_2 / K_1)^{\alpha_{\sigma}}} \right)^3, \quad (18)$$

где $\alpha_{\sigma} = 0,333 - 0,097(1 - K_2 / K_1)$.

Зависимость (18) необходима при разработке методики оценки изгибной прочности зубьев ПКП.

В выражения (5), (7) входит ранее нерассмотренный параметр a_i – податливость i -й пары зубьев, вызываемая их изгибом. Для его определения воспользуемся результатами работы [23], в которой исследована деформация прямого зуба при его замене клином с более мягкими, чем жесткая заделка, условиями закрепления, при этом учтена деформация прилегающей к зубу части обода зубчатого колеса. В результате получена следующая зависимость для расчета деформации прямого зуба в точке приложения силы (P) вследствие его изгиба:

$$W = (2,04 + \bar{y}_p^3) P / (b_w E). \quad (19)$$

Здесь b_w – ширина зуба; E – модуль упругости материала зуба; \bar{y}_p^3 – координата точки приложения силы, выраженная в долях модуля передачи, то есть если точка приложения находится на делительной окружности, то $\bar{y}_p^3=1$, если же в вершине зуба, то $\bar{y}_p^3=2,25$.

В исследуемой ПКП число зубьев шестерни и колеса отличаются на единицу, то есть зубья шестерни и зубья колеса практически идентичны, при этом точки рабочей линии в зацеплении располагаются в среднем сечении зуба. Для расчета значения параметра a_i формулы (5), на основе (19), учтем, что в процессе работы передачи деформируются (изгибаются) как зубья шестерни, так и зубья колеса, в результате для a_i используем следующее выражение:

$$a_i = 2(2,04 + \bar{y}_p^3) / (b_w E). \quad (20)$$

Определение нагрузочной способности полуобкатной плоскоконической передачи с бочкообразными зубьями привода шарового крана

Рассмотрим получение расчетных зависимостей для определения нагрузочной способности полуобкатной ПКП с локализованным по длине контактом путем раскрытия выражений (7), (8). Решение задачи проиллюстрируем на примере определения нагруженности и несущей способности ПКП, имеющей параметры: $z_1^*=64$, $z_2^*=65$, $\delta=2^\circ$, $m_n=5,0$ мм; $b_w=25$ мм, исследование геометрии которой представлено в работе [14]. Зададим величину продольной (бочкообразной) модификации поверхности зуба колеса (функции $\Delta_u(u)$) следующими параметрами эллипса: $a_u=10$ мм, $b_u=80$ мм, $\vartheta_{up}=0$. Учитывая, что зубья шестерни являются прямыми, главная приведенная кривизна (K_2) в точке контакта зубьев шестерни и колеса (в расчетной точке P) в продольном направлении зуба соответствует главной кривизне поверхности зуба колеса в этом направлении. Для расчета K_2 в расчетной точке P определяемой параметрами $u_2=0$; $\vartheta_{up}=0$ получена следующая зависимость:

$$K_2 = -\frac{a_u \sin \alpha_n \cos^2 \theta_{f_2}}{b_u^2 [1 + \sin^2 \theta_{f_2} \sin^2 \alpha_n]^{3/2}}. \quad (21)$$

Используя формулу (21), для рассматриваемой ПКП установим $K_2=0,0005331$.

Для определения главной приведенной кривизны (K_1) в точке контакта зубьев шестерни и колеса (в расчетной точке P) в профильном направлении зуба учтем, что, поскольку в этом направлении зубья колеса являются прямолинейными, величина K_1 соответствует главной кривизне поверхности зуба шестерни по профилю. Для расчета K_1 в точке P на основании результатов исследования процесса формообразования поверхности зуба шестерни полуобкатной ПКП получено выражение:

$$K_1 = \frac{f_u \begin{pmatrix} \sin \alpha_n w_{\varphi x} - \\ -\cos \alpha_n \sin \theta_{f_2} w_{\varphi y} \end{pmatrix} - f_h \cos \theta_{f_2} w_{\varphi z}}{f_\varphi \cos \theta_{f_2} \sin \alpha_n}, \quad (22)$$

в котором обозначено:

$$\begin{aligned} w_{\varphi x} &= (i \cos \delta - 1) \cos \alpha_n / i; \\ w_{\varphi y} &= \sin \alpha_n [i \sin(\theta_{f_2} - \delta) - \sin \theta_{f_2}] / i; \\ f_u &= -\cos \alpha_n [i \sin(\theta_{f_2} - \delta) - \sin \theta_{f_2}] / i; \\ f_h &= -[i \sin(\theta_{f_2} - \delta) - \sin \theta_{f_2}] / i. \end{aligned}$$

Формула (22) позволяет вычислить величину $K_1=0,00075$.

Рассмотрим процедуру определения функции минимальных зазоров в многопарном зацеплении ПКП, входящую в уравнение (7). Для решения задачи обратимся к рис. 3, на котором представлена схема ПКП и системы координат $S_1=(x_1, y_1, z_1)$, $S_2=(x_2, y_2, z_2)$, в которых описаны поверхности зубьев шестерни (2) и колеса (3).

Определим элементы b_{ij} , $i=\overline{1,4}$, $j=\overline{1,4}$ матрицы перехода $\tilde{A}_{12}(\psi_1, \psi_2)$ от системы координат $S_2=(x_2, y_2, z_2)$ к системе координат $S_1=(x_1, y_1, z_1)$:

$$\begin{aligned} b_{11} &= \cos \psi_1 \cos \delta \cos \psi_2 + \sin \psi_1 \sin \psi_2; \\ b_{12} &= -\cos \psi_1 \cos \delta \sin \psi_2 + \sin \psi_1 \cos \psi_2; \\ b_{13} &= \cos \psi_1 \sin \delta; \quad b_{14} = d \cos \psi_1 \sin \delta, \\ b_{21} &= -\sin \psi_1 \cos \delta \cos \psi_2 + \cos \psi_1 \sin \psi_2; \\ b_{22} &= \sin \psi_1 \cos \delta \sin \psi_2 + \cos \psi_1 \cos \psi_2; \\ b_{23} &= -\sin \psi_1 \sin \delta; \quad b_{24} = -d \sin \psi_1 \sin \delta; \\ b_{31} &= -\sin \delta \cos \psi_2; \quad b_{32} = \sin \delta \sin \psi_2; \quad b_{33} = \cos \delta; \\ b_{34} &= d \cos \delta - c; \quad b_{41} = b_{42} = b_{43} = 0; \quad b_{44} = 1, \quad (23) \end{aligned}$$

где углы ψ_1 и ψ_2 определяют поворот, соответственно, шестерни и колеса вокруг своих осей вращения в передаче, а параметры d и c рассчитываются по зависимостям:

$$c = r_1(1 - i \cos \delta) / (i \sin \delta); \quad d = r_1(i \cos \delta - 1) / \sin \delta.$$

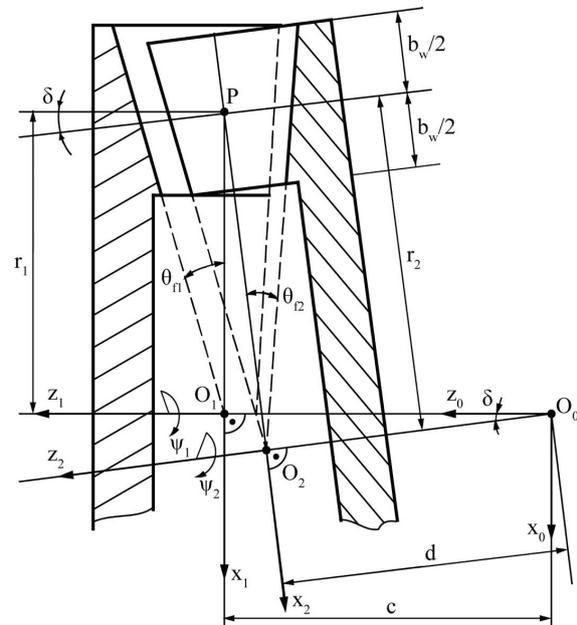


Рис. 3. Схема плоскоконической передачи и используемые системы координат

Fig. 3. Designed scheme of bevel gears with a small shaft angle with a non-generated gear and a generated pinion and used coordinate systems

Следуя теории пространственных зубчатых передач [15, 16, 18], условие касания поверхностей зубьев шестерни и колеса, учитывая матрицу $\tilde{A}_{12}(\psi_1, \psi_2)$ (23), имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{r}_1(u_1, h_1, \varphi_1, V_1) &= \tilde{A}_{12}(\psi_1, \psi_2) \tilde{r}_2(u_2, h_2, V_2); \\ \tilde{m}_1(u_1, h_1, \varphi_1, V_1) &= \tilde{A}_{12}(\psi_1, \psi_2) \tilde{m}_2(u_2, h_2, V_2); \\ f_1(u_1, h_1, \varphi_1, V_1) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

где \tilde{r}_1 , \tilde{m}_1 – матрицы-столбцы, составленные из проекций (2) радиуса вектора \tilde{r}_1 и орта нормали \tilde{m}_1 поверхности зуба шестерни; \tilde{r}_2 , \tilde{m}_2 – матрицы-

столбцы, составленные из проекций (3) радиуса вектора \vec{r}_2 и орта нормали \vec{m}_2 поверхности зуба колеса; последним в (24) записано уравнение зацепления (2).

В развернутой форме условие (24) носит название обратной задачи теории зацепления [15, 16, 18] и представляет собой систему шести трансцендентных уравнений (совпадение проекций ортов нормалей определяется не тремя, а двумя независимыми уравнениями) с семью неизвестными: $u_1, h_1, \varphi_1, u_2, h_2, \psi_1$ и ψ_2 . Решение системы (24) выполняется численными методами при фиксированной фазе зацепления ($\psi_1 = \text{const}$).

Алгоритм расчета зазоров в соседних с контактирующими (геометрически) парами зубьев при $\psi_1 = \text{const}$ заключается в следующем. Зададимся фазой зацепления передачи $\psi_1 = \text{const}$. Решая обратную задачу зацепления (систему трансцендентных уравнений (24)), определим величину угла поворота колеса ψ_2 в зацеплении ПКП. Обозначим найденные величины углов верхним индексом 0 (ψ_1^0, ψ_2^0), показывающим, что пара зубьев с № 0 находится в контакте. Рассмотрим следующую пару зубьев с номером $n=1$. В этой же фазе зацепления значение угла ψ_1^1 , соответствующее паре зубьев с № 1, равно:

$$\psi_1^1 = \psi_1^0 + 2\pi n / z_1^*, \quad (25)$$

где z_1^* – число зубьев шестерни; n – номер пары (0; ±1; ±2; ±3 и т. д.).

Из выражения (25) следует, что к углу ψ_1^0 добавлен угловой шаг зубьев шестерни. При значении $\psi_1 = \psi_1^1$ решим систему уравнений (24) и установим величину угла поворота колеса в рабочем зацеплении $\psi_2^1 = \psi_2$, при котором будет обеспечен геометрический контакт в паре зубьев с № 1. Для сопряженных передач угол ψ_2^1 соответствует зависимости:

$$\psi_2^1 = \psi_2^0 + 2\pi n / z_2^*, \quad (26)$$

где z_2^* – число зубьев колеса.

Поскольку исследуемая ПКП вследствие модификации поверхности зуба колеса является приближенной, выражение (26) не выдерживается. Используя найденное значение ψ_2^1 , найдем величину $\delta\psi_2^1$ – компенсирующего поворота колеса, при котором пара зубьев с номером $n=1$ вступит в контакт:

$$\delta\psi_2^1 = \psi_2^1 - \psi_2^0 - 2\pi n / z_2^*. \quad (27)$$

В процессе решения системы уравнений (24) не только определяются параметры $h_1, h_2, u_1, u_2, \varphi_1, \psi_2$, но и проекции координат x_2, y_2, z_2 (3) радиуса вектора \vec{r}_2 точки контакта поверхностей зубьев шестерни и колеса. С учетом знания этих проекций и полученного значения $\delta\psi_2^1$ величина минимального зазора в паре зубьев с номером $n=1$ рассчитывается по формуле:

$$\Delta_r^1 = \delta\psi_2^1 \vec{r}_2 = \delta\psi_2^1 \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}. \quad (28)$$

Поступая аналогичным образом для пар зубьев с $n = \pm 1; \pm 2, \dots$ на основе выражений (27), (28) устанавливается совокупность поворотов $\delta\psi_2^n$ и величин минимальных зазоров Δ_r^n .

В результате реализации рассмотренной процедуры с помощью разработанной в системе MathCad [24] программе полученные для исследуемой полуобкатной ПКП величины минимальных зазоров в зубчатых парах, соседних с контактирующей, представлены на рис. 4.

Воспользовавшись результатами расчета Δ_r^n , представим функцию $(F_n - F_i)$ выражения (7) для трех пар зубьев ($n=2$) в виде:

$$(F_n - F_i) = S_0(\theta_n - \theta_i) = (F_3 - F_i) = S_0(\theta_3 - \theta_i); \quad (29)$$

$$\theta_n = (n - 1)2\pi / z_1^* = 4\pi / z_1^*; \quad \theta_i = (|i| - 1)2\pi / z_1^*,$$

где $S_0 = 0,098$; $i = \pm 1, \pm 2$ ($i = \pm 1$ это одна пара, в которой зазор равен нулю).

Для известной величины K_1 по формуле (10) рассчитаем значение коэффициента $b_i = 2,943 \cdot 10^{-5}$, а по выражению (20) – значение коэффициента $a_i = 5,597 \cdot 10^{-6}$ мм/Н. После чего, решая трансцендентное уравнение (7) с учетом полученного для функции $(F_n - F_i)$ выражения (29), определим усилия, воспринимаемые каждой из трех пар зубьев: $P_{i=2} = 11390$ Н; $P_{i=\pm 1} = 24650$ Н; $P_{i=2} = 11390$ Н, зная которые, по зависимости (4) рассчитаем величину крутящего момента $T_1 = 4323,14$ НМ. Для расчета максимальных контактных напряжений

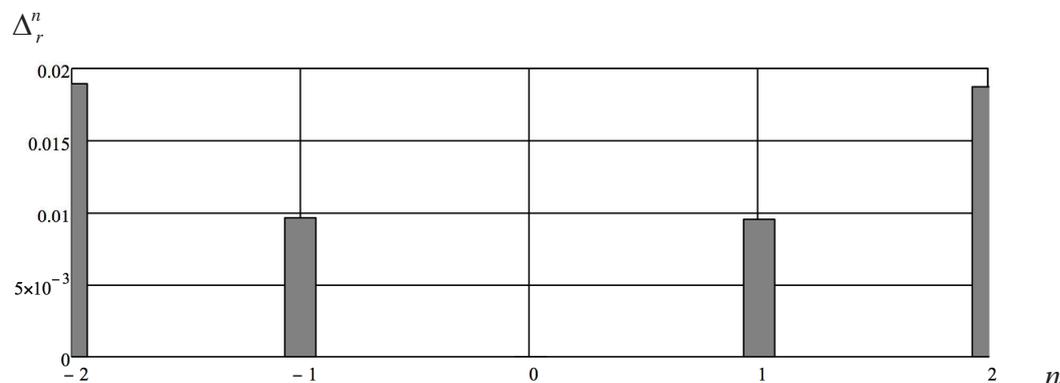


Рис. 4. Величины Δ_r^n в зубчатых парах, соседних с контактирующей

Fig. 4. Values Δ_r^n in gear pairs adjacent to the contacting one



Рис. 5. Ручные приводы четверть оборотного шарового крана ДУ 300 на основе ПКП

Fig. 5. Manual drives of quarter turn ball DN 300 based on bevel gears with a small shaft angle with a non-generated gear and a generated pinion

σ_{H1} , возникающих в контактирующих парах, достаточно воспользоваться выражениями (9): $\sigma_{H_{i=-2}}=230,882$ МПа; $\sigma_{H_{i=\pm 1}}=298,66$ МПа; $\sigma_{H_{i=+2}}=230,882$ МПа.

Поставим задачу определения крутящего момента T_1 , если величина допускаемого контактного напряжения материала зубчатых колес равна $[\sigma_H]=550$ МПа. Обратившись к зависимости (14), рассчитаем значение P_{\max} , подставляя которое в формулу (5), установим величину деформации $W_1=\Delta=0,085$, принимаемую ранее равной нулю. Учитывая эту деформацию в функции зазоров между контактирующими парами зубьев, вновь, решая трансцендентное уравнение (7), определим усилия, воспринимаемые каждой из трех пар зубьев: $P_{i=-2}=138700$ Н; $P_{i=\pm 1}=153600$ Н; $P_{i=2}=138700$ Н. Возникающие в парах зубьев контактные напряжения рассчитаем по формуле (9): $\sigma_{H_{i=-2}}=531,137$ МПа; $\sigma_{H_{i=\pm 1}}=549,610$ МПа; $\sigma_{H_{i=+2}}=531,137$ МПа, а передаваемый передачей крутящий момент – по выражению (4) $T_1=39280,0$ НМ. В завершение расчетов представим значения полудлины площадок контакта l_{ai} , вычисленных для каждой пары по формулам (11): $l_{ai=-2}=9,699$ мм, $l_{ai=\pm 1}=10,036$ мм, $l_{ai=2}=9,699$ мм, и полуширин площадок контакта, рассчитанных по выражениям (12): $l_{ai=-2}=4,624$ мм, $l_{ai=\pm 1}=4,785$ мм, $l_{ai=2}=4,624$ мм. Поскольку ширина зуба колеса равна $b_w=25$ мм, заключаем, что при используемой продольной модификации поверх-

ности зуба кромочный контакт в зацеплении зубьев отсутствует.

На рис. 5 показаны изготовленные приводы шарового крана ДУ300, содержащие ПКП с описанными выше параметрами и коническую передачу ($i=5$).

Испытания приводов при $T_1=40000,0$ НМ подтвердили работоспособность передачи в течение требуемого по техническим условиям эксплуатации числа циклов закрытия и открытия шарового крана (5000 циклов).

Заключение

Для проектирования приводов запорной арматуры нефтегазопроводов на основе полуобкатных плоскоконических передач разработана методика их проверочного расчета на контактную прочность при заданной величине крутящего момента. Методика учитывает особенности геометрии многопарного контактирования поверхностей зубьев колеса и шестерни полуобкатной передачи с продольной локализацией контакта, контактные и изгибные деформации зубьев. Представлен пример расчета нагрузочной способности полуобкатной плоскоконической передачи соосного редуктора с передаточным отношением 65 привода шарового крана ДУ-300. Результаты расчета нагрузочной способности передачи подтверждены ее испытанием в составе привода шарового крана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Набиев Р.М. Червячный редуктор электропривода – пережиток прошлого или актуальная классика // Территория Нефтегаз. – 2010. – № 6. – С. 100–102.
2. Geometry and investigation of Klingelnberg-type worm gear drive / F.L. Litvin, K. Yukishima, K. Hayasaka, I. Gonzalez-Perez, A. Fuentes // Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME. – 2007. – V. 129 (1). – P. 17–22.
3. Айрапетов Э.Л. Распределение нагрузки между зубьями глобоидной передачи: колебания редукторных систем. – М.: Наука, 1980. – 136 с.
4. Спиroidные редукторы трубопроводной арматуры / В.И. Гольдфарб и др. – М.: Вече, 2011. – 222 с.
5. Face Gear Drive with Spur Involute Pinion: Geometry, Generation by a Worm, Stress Analysis / F.L. Litvin, A. Fuentes, C. Zanzi, M. Pontiggia, R.F. Handschuh // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2002. – V. 191. – P. 2785–2813.
6. Goldfarb V.I., Trubachev E.S. Manufacturing synthesis of spiroid gearing // Proceeding of the 2004 the Eleventh World Congress in Mechanism and Machine Science. – Tianjin, China, 2004. – P. 901–904.
7. Goldfarb V.I., Trubachev E.S., Savelieva T.V. Unification of the hobs in spiroid gears // VDI Berichte. – 2005. – Iss. 1904 II. – P. 1755–1759.
8. Slip bearing and lubricants in low-speed heavy-duty spiroid gears // V.I. Goldfarb, S.M. Reshetnikov, E.S. Trubachev, E.V. Kharanzhevskii, A.S. Kuznetsov, A.A. Kornilov // Russian Engineering Research. – 2015. – V. 35. – Iss. 8. – P. 584–588.
9. Trubachev E. Several issues of tooth generating process by two-parametric families of generating lines // Mechanisms and Machine Science. – 2016. – V. 34. – P. 97–116.
10. Syzrantsev V., Kotlikova V. Mathematical and program provision of design of bevel gearing with small shaft angle // Proceedings of the International Conference on Gearing, Transmissions, and Mechanical Systems. – UK, 3–6 July, 2000. – P. 13–18.
11. The Design and Production of Drives Based on Pan Process Gear for Oil and Gas Machinery / V. Syzrantsev, J. Denisov, V. Wiebe, A. Pazyak // ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. – Boston, USA, 2015. – V. 10. – P. V010T11A057; 8 pages. DOI: 10.1115/DETC2015-47096.
12. Syzrantsev V.N., Syzrantseva K.V., Pazyak A.A. Calculating geometric parameters of the semi-rolled straight pan gear // Proceedings of the 6th International Symposium on Industrial Engineering – SIE 2015. – Belgrade, Serbia, 24–25 September, 2015. – P. 334–337.
13. Соосный редуктор: пат. Рос. Федерация № 2529943; заявл. 16.04.2013, опубл. 10.10.2014. – Бюл. № 28. – 8 с.
14. Пазяк А.А., Сызранцев В.Н. Продольная модификация поверхности зуба колеса полуобкатной прямозубой плоскоконической передачи // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2016. – № 3. – С. 122–129.
15. Litvin F.L., Fuentes A. Gear Geometry and Applied Theory. – Cambridge, UK: University Press, 2004. – 800 p.
16. Лопато Г.А., Кабатов Н.Ф., Сегаль М.Г. Конические и гипоидные передачи с круговыми зубьями. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
17. Шевелева Г.И. Теория формообразования и контакта движущихся тел. – М.: Станкин, 1999. – 494 с.
18. Litvin F.L. Development of Gear Technology and Theory of Gearing. – Cleveland, Ohio, USA, NASA Reference Publication, 1998. – 124 p.
19. Airapetov E.L. Calculation of contact stresses in gear transmissions with localized tooth contact // Soviet engineering research. – 1985. – V. 5 (12). – P. 7–10.
20. Айрапетов Э.Л. Расчет контактной нагрузки в зубчатых зацеплениях // Вестник машиностроения. – 1982. – № 10. – С. 3–5.
21. Airapetov E.L. Static loading of multi-pair toothed transmissions // Soviet engineering research. – 1990. – V. 10 (1). – P. 6–10.
22. Зубчатые передачи / Е.Г. Гинзбург и др. – Л.: Машиностроение, 1980. – 416 с.
23. Airapetov E.L. Contact deformation of cylinders with parallel axes // Soviet engineering research. – 1988. – V. 6. – P. 6–10.
24. Дьяконов В. MathCad 2001: специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 832 с.

Поступила 01.03.2017 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.

Пазяк А.А., старший преподаватель кафедры машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности Тюменского индустриального университета.

UDC 621.833.2(31)

CALCULATING LOADING CAPACITY OF BEVEL GEARS WITH A SMALL SHAFT ANGLE WITH A NON-GENERATED GEAR AND A GENERATED PINION FOR DRIVES OF STOP VALVES

Vladimir N. Syzrantsev¹,

v_syzrantsev@mail.ru

Andrey A. Pazyak¹,

a.a.pazyak@gmail.com

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

The relevance of the discussed issue. Nowadays, most of modern stop valve drives are based on the use of worm or spiroid gears. They have very low efficiency (typically, about 0,3), at short-time work have a high moment of ultimate joint, which leads to necessity of using enhanced electric power. Implementation of remote control system of stop valve drives in the Far North causes the failure of the electric motors due to their failures as a result of «sticking» both ball valves, and worm or spiroid gears. The drives based on bevel precessional gears provide the required efficiency and reliability of stop valves in selected operating conditions. The mathematical models of gear generating process have already made and the geometry of gearing have already studied for these gears. Bevel gears with a small shaft angle with a generated pinion and a non-generated gear with longitudinal tooth modification are easy to manufacture and more effective. They provide the required geometric and kinematic characteristics. At the same time, for implementing the design of bevel gears with a small shaft angle with a non-generated gear and a generated pinion it is necessary to determine their loading capacity under the criterion providing contact strength. The principal difficulty of solving this problem is the presence of several pairs in gears mesh. The number of gear pairs depends on the geometry of tooth surfaces, transmitted torque, bending and contact deformation in gears mesh.

The main aim of the study is to develop a methodology for calculating loading capacity by value of transmitted torque considering the condition to ensure contact strength. Geometry of gears teeth and mechanical characteristics of the gear material are known.

The methods used in the study: theory of gearing, methods of structural mechanics based on eliminating static indeterminacy of elastic systems with one-sided constraints, numerical techniques of the transcendental (nonlinear) equations.

The results. The authors have developed a method of checking calculation on contact strength at a given torque for designing drives of pipeline valve drives based on bevel gears with a small shaft angle with a non-generated gear and a generated pinion. The methodology is illustrated by the example of the loading capacity calculation of coaxial gearbox with gear ratio 65 of the ball valve drives DN 300.

Key words:

Bevel gears with a small shaft angle with a non-generated gear and a generated pinion, localized contact, multiple contact, contact stresses, loading capacity.

REFERENCES

- Nabiev R.M. Screw gear motor is a relic of the past or current classical. *Territoria neftegaz – Oil and gas territory*, 2010, no. 6, pp. 100–102. In Rus.
- Litvin F.L., Yukishima K., Hayasaka K., Gonzalez-Perez I., Fuentes A. Geometry and investigation of Klingelnberg-type worm gear drive. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 2007, vol. 129 (1), pp. 17–22.
- Ayrapetov E.L. *Raspredelenie nagruzki mezhdru zubyami globoidnoy peredachi: kolebaniya reduktornykh sistem* [Load distribution between the teeth of globoidal gears: Oscillations of gear systems]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 136 p.
- Goldfarb V.I. *Spiroidnye reduktory truboprovodnoy armatury* [Spiroid Gearboxes for Pipeline Valves]. Moscow, Veche Publ., 2011. 222 p.
- Litvin F.L., Fuentes A., Zanzi C., Pontiggia M., Handschuh R.F. Face Gear Drive with Spur Involute Pinion: Geometry, Generation by a Worm, Stress Analysis. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2002, vol. 191, pp. 2785–2813.
- Goldfarb V.I., Trubachev E.S. Manufacturing synthesis of spiroid gearing. *Proceeding of the 2004 the Eleventh World Congress in Mechanism and Machine Science*. Tianjin, China, 2004. pp. 901–904.
- Goldfarb V.I., Trubachev E.S., Savelieva T.V. Unification of the hobs in spiroid gears. *VDI Berichte*, 2005, Iss. 1904 II, pp. 1755–1759.
- Goldfarb V.I., Reshetnikov S.M., Trubachev E.S., Kharanzhevskii E.V., Kuznetsov A.S., Kornilov A.A. Slip bearing and lubricants in low-speed heavy-duty spiroid gears. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35, Iss. 8, pp. 584–588.
- Trubachev E. Several issues of tooth generating process by two-parametric families of generating lines. *Mechanisms and Machine Science*, 2016, vol. 34, pp. 97–116.
- Syzrantsev V., Kotlikova V. Mathematical and program provision of design of bevel gearing with small shaft angle. *Proceedings of the International Conference on Gearing, Transmissions, and Mechanical Systems*. UK, 3–6 July, 2000. pp. 13–18.
- Syzrantsev V., Denisov J., Wiebe V., Pazyak A. The Design and Production of Drives Based on Pan Precess Gear for Oil and Gas Machinery. *ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Boston, USA, 2015. Vol. 10, pp. V010T11A057, 8 pages. DOI: 10.1115/DETC201547096.
- Syzrantsev V.N., Syzrantseva K.V., Pazyak A.A. Calculating geometric parameters of the semi-rolled straight pan gear. *Proceedings of the 6th International Symposium on Industrial Engineering – SIE 2015*. Belgrade, Serbia, 24–25, September, 2015. pp. 334–337.
- Denisov Yu.G., Syzrantsev V.N., Vibe V.P. *Soosny reduktor* [Coaxial gearbox]. Patent RF, no. 2529943, 2014.
- Pazyak A.A., Syzrantsev V.N. Longitudinal crowning of the gear tooth surface of straight bevel gears with a small shaft angle with non-generated gear and generated pinion. *Higher Educational Institutions News. Oil and Gas*, 2016, no. 3, pp. 122–129. In Rus.
- Litvin F.L., Fuentes A. *Gear Geometry and Applied Theory*. Cambridge, UK, University Press, 2004. 800 p.

16. Lopato G.A., Kabatov N.F., Segal M.G. *Konicheskie i gipoidnye peredachi s krugovymi zubami* [Bevel and hypoid gears with spiral teeth]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 423 p.
17. Sheveleva G.I. *Teoriya formoobrazovaniya i kontakta dvizhushchikhsya tel* [The theory of formation and contact of the moving bodies]. Moscow, Stankin Publ., 1999, 494 p.
18. Litvin F.L. *Development of Gear Technology and Theory of Gearing*. Cleveland, Ohio, USA, NASA Reference Publication, 1998. 124 p.
19. Airapetov E.L. Calculation of contact stresses in gear transmissions with localized tooth contact. *Soviet engineering research*, 1985, vol. 5 (12), pp. 7–10.
20. Airapetov E.L. Contact loads in gear engagements. *Soviet Engineering Research*, 1982, vol. 10, Iss. 2, pp. 3–5. In Rus.
21. Airapetov E.L. Static loading of multi-pair toothed transmissions. *Soviet engineering research*, 1990, vol. 10 (1), pp. 8–17.
22. Ginzburg E.G. *Zubchatye peredachi* [Gears]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1980. 416 p.
23. Airapetov E.L. Contact deformation of cylinders with parallel axes. *Soviet engineering research*, 1988, vol. 6, pp. 6–10.
24. Dyakonov V. *MathCad 2001: spetsialny spravochnik* [MathCad 2001: special reference]. St-Petersburg, Piter Publ., 2002. 832 p.

Received: 01 March 2017.

Information about the authors

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

Andrey A. Pazyak, senior lecturer, Industrial University of Tyumen.

УДК 622.276.05:658.012

СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ДОБЫЧИ НЕФТИ НА ОСНОВЕ ЭКОНОМИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ

Букреев Виктор Григорьевич¹,
bukreev@tpu.ru

Сипайлова Надежда Юрьевна¹,
sny@tpu.ru

Сипайлов Вадим Андреевич²,
Sipay@yandex.ru

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

² ОАО «Тюменьэнерго»,
Россия, 628408, Тюменская область, Ханты-Мансийский Автономный Округ – Югра, г. Сургут, ул. Университетская, 4.

Актуальность работы определяется необходимостью совершенствования системы нефтедобычи и обусловлена совокупностью геополитических, экономических и геологических факторов. Особую значимость при этом приобретают вопросы улучшения функциональных характеристик систем механизированной добычи нефти, так как такие системы являются наиболее энергоемкими. В настоящее время для решения проблем в нефтедобывающей отрасли все более широкое распространение получает идея ее интеллектуализации, подразумевающая оперативное управление процессом нефтедобычи с использованием информационно-телекоммуникационных систем и регулируемого оборудования. При разработке систем управления необходимо обеспечить достижение глобального результата – снижение затрат при нефтедобыче, что подразумевает применения принципов системного подхода и экономических критериев для оценки эффективности функционирования системы.

Цель работы: повышение эффективности функционирования электротехнических комплексов механизированной добычи нефти на основе системного подхода к управлению.

Методы исследования: системный анализ тенденций использования возможностей управления, информационных технологий и регулируемого оборудования в нефтедобывающей отрасли; синтез технико-экономических решений; методы математического моделирования.

Результаты. Разработана стратегия управления установившимися режимами работы электротехнических комплексов механизированной добычи нефти, позволяющая в режиме реального времени оптимизировать технологический процесс добычи нефти с позиций эффективного по экономическим основаниям функционирования.

Выводы. Современный потенциал информационных технологий и регулируемого нефтедобывающего оборудования используется не в полной мере. Противоречие между возможностями такого оборудования и фактическим их использованием может быть преодолено применением системного подхода к управлению с применением в качестве основных показателей эффективного функционирования систем экономических критериев.

Ключевые слова:

Механизированная добыча нефти, электротехнический комплекс, установка с электроцентробежным насосом, управление, энергоэффективность, экономический критерий.

Введение

Нефтедобывающая отрасль является одной из важнейших составляющих экономик ряда стран, в связи с чем вопросы повышения эффективности нефтедобычи (под эффективностью понимается снижение затрат ресурсов, направленных на поддержание функционирования системы) остаются приоритетными на протяжении многих десятилетий [1].

В последние годы проблемы в этой отрасли обострились, что обусловлено совокупностью факторов. К основным негативным тенденциям нефтедобычи в России можно отнести ухудшение геологической структуры запасов нефти, качества запасов (высокие обводненность, газовый фактор, давление насыщения и вязкость откачиваемой продукции) и усложнение географических условий добычи нефти [2].

В 2014 г. появились ограничения, связанные с геополитической ситуацией в мире, – ослабление экономической конъюнктуры (снижение цен на нефть и спроса на энергоресурсы на мировых рынках), запрет на поставки оборудования, технологий и привлечение финансовых средств из-за введенных против России санкций [3].

Также стоит отметить проблемы электроснабжения нефтяных предприятий (рост тарифов на электроэнергию; дефицит электросетевых мощностей 220, 500 кВ; высокая стоимость технологического подсоединения). При этом в связи с истощением месторождений наблюдается рост расходов на электроэнергию.

Все эти факторы в совокупности с неопределенностью и/или недостоверностью исходной информации, увеличивающей риски при принятии управленческих решений, приводят к росту издержек

при добыче нефти, в то время как именно этап добычи в существенной степени определяет эффективность функционирования нефтедобывающего комплекса в целом.

Обозначенные роль и проблемы нефтяной отрасли свидетельствуют об актуальности решения задач, связанных с совершенствованием системы нефтедобычи. При этом первоочередными являются вопросы повышения энергоэффективности и обеспечения энергосбережения, так как затраты на электроэнергию составляют наибольшую долю (30–35 %) всех издержек при добыче нефти [4].

Проблема снижения энергозатрат должна рассматриваться как в целом по нефтяной отрасли, так и по каждому технологическому процессу и оборудованию. Наиболее энергоемкими элементами системы нефтедобычи являются электротехнические комплексы (ЭТК) механизированной добычи нефти (в структуре энергозатрат подъем жидкости из скважин составляет 55–65 %), к которым относятся установки с электроцентробежными насосами (УЭЦН). В России ими добывается более 65 %, а в Западной Сибири – до 90 % нефти [5], в связи с чем такие установки обладают наибольшим потенциалом для снижения энергозатрат.

Пути повышения эффективности и тенденции развития механизированной добычи нефти

Повышение энергоэффективности нефтедобывающих предприятий в целом и электротехнических комплексов механизированной добычи нефти в частности обеспечивается комплексом мер организационно-управленческого и технико-технологического характера (внедрение новых техники и технологий, автоматизация и информатизация производственных процессов). При этом наиболее перспективны способы, не требующие больших капитальных затрат и обеспечивающие как снижение энергоёмкости, так и других эксплуатационных расходов.

Проводимые мероприятия направлены на усовершенствование оборудования, оптимизацию его функциональных характеристик и режимов работы. В последние годы в этом направлении достигнуты существенные результаты – современное оборудование для нефтяной отрасли характеризуется высокими показателями надежности и производительности, улучшенными сервисными возможностями [6, 7].

Благодаря развитию силовой и информационной электроники широкое применение в составе ЭТК получил регулируемый электропривод, преимущественно электропривод переменного тока с асинхронным двигателем и преобразователем частоты, что обусловлено простотой, относительно невысокой стоимостью и надежностью системы.

Успехи в развитии микропроцессорной техники, информационных и телекоммуникационных технологий, информационно-измерительных систем реального времени принципиально изменили функциональные возможности систем управления

электроприводами [8–10]. Современные станции управления погружными насосами позволяют контролировать рабочие параметры процесса добычи и производить обмен данными с верхними уровнями автоматизированных систем управления технологическими процессами; обеспечивают защиту, плавный пуск и вывод скважины на режим, предоставляют возможность поддерживать технологические параметры на заданном уровне и регулировать технологический режим скважины. Основные направления дальнейшего развития станций управления заключаются в разработке алгоритмов и программного обеспечения для эффективного управления в режиме реального времени.

Таким образом, современное развитие техники для нефтедобычи позволяет говорить о возможности перехода от регулирования отдельных электротехнических комплексов к созданию специализированных систем управления технологическими процессами нефтедобычи. Именно такой подход обеспечивает получение экономического эффекта от снижения потребляемой электроэнергии и уменьшения других эксплуатационных расходов.

Очевидно, что в обозримом будущем в механизированной добыче нефти дальнейшее развитие получит формирующаяся в последнее десятилетие концепция IWT – intelligent well technology («интеллектуальная скважина»), под которой понимается технологический комплекс наземного и подземного оборудования, включающий станцию управления, систему измерительной аппаратуры и комплект специализированных программных продуктов [8]. Целевая установка такой системы – эффективное использование имеющихся ресурсов, увеличение добычи нефти и снижение производственных издержек и рисков путем оптимизации производственных процессов нефтедобычи. Достижение цели обеспечивается благодаря управлению режимами работы системы с применением моделей и знаний специалистов в режиме реального времени [11]. «Интеллектуальная скважина» обеспечивает способность подстраиваться под реальные условия эксплуатации, автоматическую оперативную настройку на оптимальный с позиции выбранного критерия режим работы ЭТК.

Необходимо отметить, что обозначенный потенциал оптимизации технологии нефтедобычи за счет управления далеко не исчерпан – в ряде случаев задачи систем управления заключаются в мониторинге состояния оборудования, сборе информации и передаче ее на верхний уровень, а проблемы оптимизации работы оборудования на основе этих данных решаются фрагментарно. Очевидно, что разработка и применение эффективных алгоритмов автоматического управления позволит более полно использовать вычислительные возможности управляющего оборудования и повышать эффективность за счет своевременного использования получаемых данных.

В настоящее время невозможно решить данные задачи и реализовать концепцию IWT вне смысло-

вого поля iField/Smart Field («интеллектуальное месторождение» – интеллектуальная технология эффективного управления месторождением, позволяющая контролировать процесс добычи и управлять нефтяным пластом в режиме реального времени при оптимизации затрат ресурсов за счет возможности подстраиваться под реальные условия и обеспечивать корректировку действий на основе обратной связи) [12–16]. При такой технологии обеспечивается централизованное дистанционное управление большим количеством скважин, при этом для каждой скважины в отдельности вырабатываются решения по коррекции ее функционирования при сохранении уровня эксплуатационных расходов. Так как скважина является частью системы месторождения, стратегию управления ее работой (постановка задач управления, выбор целевых функций, разработка алгоритмов решения этих задач и синтез систем управления) необходимо осуществлять на основе принципов системного подхода.

Задачи, целевые функции и алгоритм управления электротехническими комплексами механизированной добычи нефти

Системный подход к управлению сложными технологическими системами нефтедобычи предполагает выделение уровней иерархии управления и подчиненность задач и условий управления последующих уровней предыдущим.

В иерархии управления нефтедобычей на уровне управления эксплуатацией месторождения (верхний уровень) решаются задачи по определению показателей объемов закачки, отбора, энергии, материальных средств. На последующих уровнях задачи конкретизируются по площадям, объектам, участкам, устанавливаются режимы и технология эксплуатации скважин. На самом нижнем уровне решаются вопросы управления режимами работы конкретных устройств технологического оборудования.

В этой системе ЭТК является главным исполнительным звеном, а задачи управления заключаются в адаптации скважины к изменяющимся условиям эксплуатации (реальные параметры жидкости, состояние эксплуатационного оборудования и т. д.), а также в определении и реализации оптимальных технологических режимов. По существу, управление заключается в оценке величины отклонения фактических показателей нефтедобычи от планируемых, формировании и обеспечении корректирующих воздействий, направленных на минимизацию уровня несоответствия. Очевидно, что эффективность управления определяется как интервалом оценки и коррекции, так и качеством используемых средств.

В механизированной добыче нефти с УЭЦН определенная стратегия управления реализуется применением в технологической схеме оборудования с регулируемой производительностью (частотно регулируемый электропривод). Решение задачи

управления состоит в выборе нового режима за счет изменения параметров (новая частота вращения двигателя). Например, изменением частоты вращения двигателя (изменением производительности УЭЦН) можно добиться оптимального отбора жидкости за счет согласования ее объема с притоком из пласта.

Дальнейшее совершенствование эксплуатации ЭТК возможно за счет решения задач оптимизации режимов работы, при этом постановка задачи оптимизации и критерий оптимальности должны согласовываться с понятиями «интеллектуальная скважина» и «интеллектуальное месторождение». В связи с этим условие оптимальности работы установок должно быть сформулировано на основе системного подхода к проектированию и оптимизации сложных систем.

Из теории оптимизации сложных объектов известно, что оптимизация системы по «частям» обычно приводит к решениям, далеким от оптимальных для системы в целом. Так, оптимизация работы отдельных установок по какому-либо критерию отнюдь не означает, что эффективной будет работа всей технологической системы добычи нефти на месторождении. Например, установка на скважине частотно регулируемого привода и корректное управление им улучшат энергетическую эффективность электротехнического комплекса, в то же время в связи с высокой стоимостью установка может не окупиться в приемлемые сроки и в целом для предприятия экономический эффект не будет достигнут.

Наиболее обобщенными показателями качества функционирования системы нефтедобычи являются экономические показатели, в связи с чем в настоящее время широкое распространение получает идея управления параметрами технологического процесса по экономическим основаниям [17–20]. Именно экономические критерии в силу их универсальности и однозначности позволяют достичь основного результата – минимизации себестоимости единицы продукции – добываемой тонны нефти. Расчеты подтверждают, что использование экономического критерия в качестве целевой функции обеспечивает возможность рациональной эксплуатации скважины и оборудования в интересах всей системы нефтедобычи [18]. Оптимизация работы установок по экономическим основаниям согласуется с концепцией Smart Field, так как в конечном итоге технология Smart Field направлена на повышение рентабельности освоения запасов углеводородов.

Таким образом, использование экономических критериев в качестве целевых функций при оценке эффективности и разработке алгоритмов управления работой установок является перспективным направлением оптимизации технологических режимов индивидуальных скважин и всего комплекса нефтедобычи.

В общем виде задача оптимизации состоит в определении критерия оптимизации, независи-

мых параметров, области их допустимых значений и границ изменения характеристик функционирования системы, а также в разработке моделей, описывающих связи между параметрами.

Постановка задачи оптимизации режимов работы ЭТК предполагает рассмотрение технологической схемы «пласт–скважина–ЭТК» в качестве системы, на вход которой поступает вектор параметров $X(t)=(X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t))$, а скалярный выход $F(X(t))$ характеризует качество процесса. Оптимизация процесса заключается в определении вектора управляющих воздействий $R(t)=(R_1(t), R_2(t), \dots, R_m(t))$, оптимизирующих целевую функцию $F(X(t), R(t))$ при условии выполнения заданных ограничений. При этом выходы $h_1(t), h_2(t), \dots, h_n(t)$ описывают состояние процесса и отслеживают нежелательные режимы работы или выход контролируемых параметров технологического процесса за установленные пределы $h_j(t) \leq b_j, j=1, m$ (b_j – допустимые значения соответствующих параметров).

Регулирование параметров ЭТК в системах управления нефтедобычи замкнутого типа направлено на устранение рассогласования между плановыми показателями эффективности, являющимися по сути оптимальными для конкретной технологической схемы разработки месторождения, и фактическими. Следует заметить, что плановые показатели эффективности, определяемые на этапе проектирования, также могут быть скорректированы в процессе эксплуатации с учетом вновь получаемой информации. Очевидно, что эффективность управления тем выше, чем меньше интервал коррекции, что нацеливает на создание алгоритмов управления, действующих в режиме реального времени.

В соответствии с подходом к оптимизации технологических процессов реализация стратегии управления ЭТК по экономическим основаниям подразумевает определение плановых показателей экономической эффективности, непрерывный контроль над параметрами системы «пласт–скважина–ЭТК», сравнение фактического показателя эффективности с плановым значением и формирование соответствующей команды на изменение режима работы с целью обеспечения условия приближения фактического показателя к плановому на интервале управления:

$$\Delta K(\bar{R}, \bar{X}) = K_{fact}(\bar{R}, \bar{X}) - K_{plan} \rightarrow \min;$$

$$\Delta K(\bar{R}, \bar{X}) \geq 0,$$

где K_{plan} и K_{fact} – плановый и фактический показатели экономической эффективности; \bar{X} – вектор входных параметров ЭТК; \bar{R} – вектор управляющих воздействий.

Блок-схема алгоритма управления ЭТК механизированной добычи нефти на основе экономического критерия представлена на рис. 1.

Исходные данные представлены следующими блоками параметров:

- экономические параметры, служащие для оценки фактического значения экономическо-

го критерия, и оптимальное (плановое) его значение;

- параметры оборудования (например, геометрические размеры, рабочие характеристики отдельных элементов УЭЦН);
- ограничения, определяющие нормальный технологический режим работы скважины (например, предельно допустимая обводненность откачиваемой жидкости; содержание свободного газа на приеме насоса; допустимая температура пластовой жидкости на приеме насоса; допустимая температура обмотки статора двигателя; предельные уровни, давление на приеме насоса; механические нагрузки).

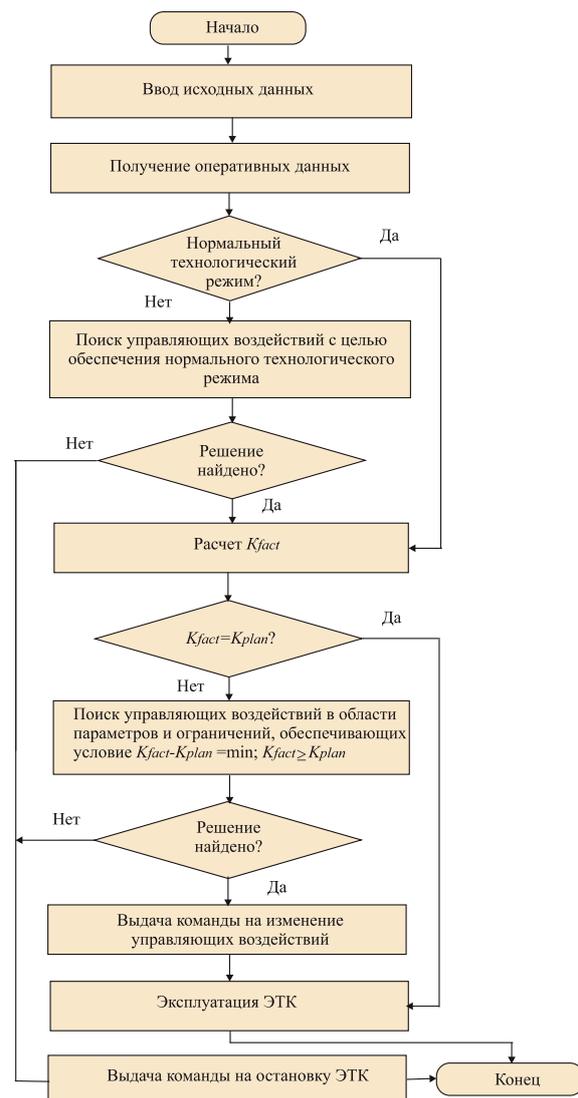


Рис. 1. Блок-схема алгоритма управления ЭТК

Fig. 1. Diagram of installation control algorithm

Оперативная информация, необходимая для расчета оптимальных значений управляющих воздействий, определяется по замерам и путем вычислений на математических моделях [20–22].

На основе результатов расчета принимаются управляющие решения – прекращение работы

установки (в случае нарушения нормального технологического режима и/или невозможности достижения эффективной работы за счет управляющих воздействий, либо продолжение эксплуатации скважины или изменение режима работы ЭТК (например, переход на новую частоту вращения насоса УЭЦН с целью достижения планового коэффициента эффективности).

Возможность практической реализации задач управления ЭТК механизированной добычи нефти рассмотрим на примере управления УЭЦН.

Вопросы практической реализации алгоритмов управления электротехнических комплексов

При отсутствии возможности регулирования в режиме реального времени всех издержек при эксплуатации УЭЦН (затраты на амортизацию, ремонт и т. д.) в качестве критерия оптимальной работы установки нами предложено принять коэффициент эффективности использования электроэнергии

$$K = \frac{C_{oil} - E_{energy}}{E_{energy}} = C_{oil} / E_{energy} - 1, \quad (1)$$

где C_{oil} – стоимость продукции (нефти); E_{energy} – затраты на электроэнергию.

Плановое (оптимальное) значение данного коэффициента определяется для установок исходя из условия экономической эффективности системы высшего уровня с учетом определяющих факторов (геологических, гидродинамических, технологических, экономических). Например, учитываются возможности и стоимость мероприятий по повышению энергоэффективности (в нашем случае – применение установок с регулируемой производительностью), стоимость энергоресурсов, затрачиваемых на поддержание пластового давления и прочее вспомогательное производство и т. д. Таким образом, затраты, не связанные непосредственно с процессом отбора (извлечения) продукта на поверхность, косвенным образом учитываются при расчете плановых показателей эффективности.

Затраты на электропотребление зависят от режима работы ЭТК и изменяются в зависимости от объема потребляемой электроэнергии и стоимости ее покупки.

Выражение, определяющее затраты на электроэнергию при добыче одной тонны нефти, выглядит следующим образом:

$$E_{energy} = C_{energy} P / Q_{oil}, \quad (2)$$

где C_{energy} – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии на месторождении с учетом мощности; P – потребляемая установкой мощность, кВт; Q_{oil} – дебит скважины по нефти, т/ч.

С учетом (2) формула (1) для расчета фактического коэффициента эффективности использования электроэнергии приобретает вид:

$$K_{fact} = \frac{C_{oil} Q_{oil}}{C_{energy} P} - 1.$$

Дебит скважины по нефти зависит от дебита скважины по жидкости, обводненности продукции и плотности нефти

$$Q_{oil} = Q_{liq} (1 - b) \rho,$$

где Q_{liq} – дебит скважины по жидкости, м³/ч; b – обводненность продукции, о.е.; ρ – плотность нефти, т/м³.

Очевидно, что при известных параметрах жидкости и сложившихся на данный момент значениях экономических показателей (стоимость нефти и стоимость электроэнергии) задача оптимизации процесса сводится к регулированию дебита и потребления электроэнергии. Для приближения K_{fact} к плановому значению K_{plan} необходимо либо снижать дебит по жидкости, либо увеличивать его при соответствующем изменении энергопотребления. Для уменьшения K_{fact} с целью минимизации $\Delta K = K_{fact} - K_{plan}$ необходимо снизить соотношение Q_{liq}/P в рамках технологических ограничений, увеличивая значение частоты вращения ротора ω_{r1} двигателя насоса на расчетную величину $\Delta\omega_{r1}$ для получения соответствующего нового значения частоты вращения $\omega_{r2} = \omega_{r1} + \Delta\omega_{r1}$. Соотношение Q_{liq}/P уменьшается пропорционально значению $(\omega_{r2}/\omega_{r1})^2$, так как в соответствии с теоремой подобия $Q_{liq} \propto \omega_{r2}/\omega_{r1}$; $P \propto (\omega_{r2}/\omega_{r1})^3$. В случае необходимости увеличения K_{fact} частоту вращения ротора двигателя насоса следует уменьшить.

Таким образом, регулирование в режиме реального времени позволит увеличить добычу нефти установками с низкими удельными затратами на электроэнергию и снизить добычу установками с высокими удельными затратами, тем самым повысить эффективность использования электроэнергии всего предприятия и снизить себестоимость конечной продукции.

Для расчета K_{fact} и оптимальной частоты вращения двигателя используется оперативная информация, обеспечиваемая датчиками и расчетами посредством математических моделей. Текущую информацию составляют данные о параметрах пластовой жидкости (плотность, вязкость, обводненность и т. д.), параметрах скважины и насоса (дебит, давление на приеме насоса, буферное давление, динамический уровень и т. д.), потреблении электроэнергии, состоянии оборудования (температура обмотки статора, уровень вибрации и т. д.).

Поиск оптимальной частоты вращения осуществляется на основе синтезированной математической модели УЭЦН с помощью методов оптимизации. Математическая модель УЭЦН как элемента технологической системы «пласт-скважина-УЭЦН» представляет собой систему уравнений, связывающую технологические и технические показатели (дебит по жидкости – Q_{liq} ; полезный момент на валу двигателя – M ; давление на приеме насоса – P_{pump} ; потребляемый установкой ток – I ; коэффициент полезного действия – η ; коэффициент мощности установки – $\cos\varphi$) с возмущающими (пластовое давление – P_{form} ; буферное да-

вление $-P_{buf}$) и управляющими воздействиями (частота $-f$ и напряжение на выходе преобразователя $-U$).

Объединяя возможности современных профессиональных программ, предназначенных для анализа работы системы «пласт–скважина–УЭЦН» (например, SubPUMP, «Автотехнолог», RosPump и т.п.), моделирования электротехнического оборудования (MatLab) и возможности метода планирования эксперимента, можно синтезировать адекватные математические модели, удобные для практической реализации алгоритма управления на основе программируемых контроллеров. При этом вычислительные эксперименты по определению связей между параметрами, проводимые с помощью указанных программ, обеспечивают возможность учесть реальную структуру и практически все существенные технические и технологические параметры системы (конкретной установки и скважины) и, соответственно, обеспечить высокую точность моделей. Метод планирования эксперимента позволяет получить зависимости

$$Q_{liq} = F_1(\omega_r, P_{form}, P_{buf}), \quad M = F_2(\omega_r, P_{form}, P_{buf}),$$

$$P_{pump} = F_3(\omega_r, P_{form}, P_{buf})$$

и

$$I = F_4(f, U, M), \quad \omega_r = F_5(f, U, M),$$

$$\eta = F_6(f, U, M), \quad \cos \varphi = F_7(f, U, M)$$

в форме алгебраических уравнений.

Полученные уравнения позволяют определить рабочую точку погружного насоса на основе контроля текущего состояния технологического процесса добычи нефти с применением информационно-измерительных средств и обеспечивают поиск оптимального режима работы установки при заданных технологических ограничениях путем подбора частоты вращения двигателя в режиме реального времени. Сопоставления измеренных на работающей скважине величин с их расчетными значениями (таблица) подтвердили высокую точность синтезированных моделей.

Таблица. Результаты измерений и расчетов технологических показателей скважины

Table. Results of measurements and calculations of well technological parameters

Измеренные величины Measured values							Расчетные значения и погрешности Rated values and errors	
№ замера Sampling	I, A	U, B (V)	$f, Гц$ (Hz)	P_{buf}	P_{pump}	Q_{liq}	Q_{liq}	$\Delta Q_{liq},$ %
				МПа (MPa)	МПа (MPa)	м ³ /сут m ³ /day	м ³ /сут m ³ /day	
1	15,86	345,80	45,50	8,00	11,43	36,40	35,927	1,3
2	16,20	345,80	45,50	3,00	8,8	46,10	47,163	-2,31
3	16,20	353,40	46,50	8,00	11,02	38,40	37,425	2,54
4	16,54	361,00	47,50	8,00	10,54	40,10	38,542	3,89
5	16,88	368,60	48,50	8,00	10,08	41,70	39,797	4,56

Для оценки текущего значения частоты вращения насоса также можно использовать подход, основанный на сравнении значений реактивной мощности электродвигателя, вычисляемых по двум моделям [23]. Одна из моделей (рис. 2) выполняет функцию эталонной модели, используя текущие значения фазных токов $i_{sa}(t), i_{sb}(t), i_{sc}(t)$ и напряжений $u_{sa}(t), u_{sb}(t), u_{sc}(t)$ статора двигателя для непосредственного определения реактивной мощности. Предполагается, что текущие значения переменных состояния преобразуются блоком преобразования координат в соответствующие компоненты пространственного вектора в неподвижной системе координат α, β : напряжения $u_{s\alpha}(t), u_{s\beta}(t)$ и токи $i_{s\alpha}(t), i_{s\beta}(t)$ статора двигателя.

Другая модель имеет свойства сигнальной перенастройки параметров и представляет собой адаптивную модель, которая вычисляет оценку реактивной $\hat{q}(t)$ мощности двигателя с использованием наблюдаемых текущих значений $\hat{\omega}(t)$ частоты вращения в реальном времени.

Наиболее распространенным законом преобразования ошибки $\varepsilon(t)$ в оценку $\hat{\omega}(t)$ частоты вращения двигателя является пропорционально-интегральный закон, который в дискретной форме имеет вид:

$$\hat{\omega}_r(k+1) = \hat{\omega}_r(k) + K_p |\varepsilon(k) - \varepsilon(k-1)| + CK_I T \varepsilon(k), \quad (3)$$

где C – нормирующий коэффициент; T – период дискретизации; K_p, K_I – соответственно коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих закона преобразования.

Коэффициенты K_p, K_I закона (3) в блоке вычисления оценки частоты вращения выбираются таким образом, чтобы текущая ошибка $\varepsilon(t)$ стремилась к определенному заданному $\varepsilon_{зад}$ значению:

$$\varepsilon(t) = [q(t) - \hat{q}(t)] \rightarrow \varepsilon_{зад}.$$

В качестве критерия оптимальности используется среднеквадратическая ошибка, коэффициенты K_p, K_I в блоке оптимизации определяются в положительной области значений следующей функции:

$$S(K_p, K_I, k) = \frac{1}{3} \left(|\varepsilon(k-2, K_p, K_I)| + |\varepsilon(k-1, K_p, K_I)| + |\varepsilon(k, K_p, K_I)| \right),$$

$$(K_p, K_I) = \arg \min_{K_p > 0, K_I > 0} S(K_p, K_I, k), \quad (4)$$

где k – целое вещественное число, характеризующее номер итерации вычислений.

Так как явный вид функции (4) первоначально неизвестен, а численное вычисление ее производной требует больших вычислительных затрат, то целесообразно использовать методы оптимизации, которые не требуют вычисления производных. Для нахождения минимума функции $S(K_p, K_I, k)$, однозначно определяющий коэффициенты K_p, K_I в (3), чаще всего применяется алгоритм Нелдера–Мида. Алгоритм оценки в режиме реального времени те-

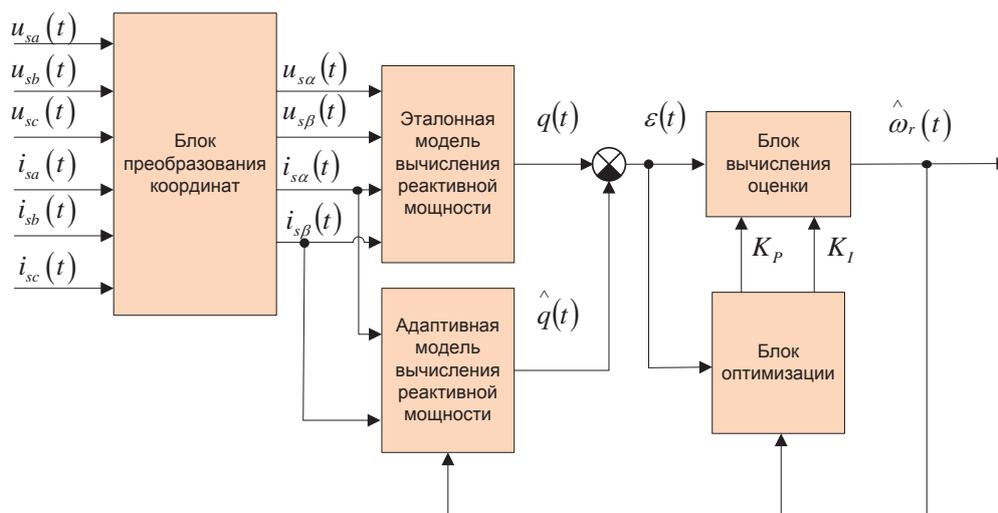


Рис. 2. Функциональная схема наблюдателя состояний для оценки частоты вращения асинхронного электродвигателя УЭЦН

Fig. 2. Diagram of observer to value the rotation frequency of induction motor

кующих значений $\hat{\omega}_r(t)$ частоты вращения ротора двигателя позволяет построить тренд установившихся значений ω_r и создать основу для прогнозирования параметров рабочей точки погружного насоса.

На основе предложенной стратегии разработана система управления УЭЦН [24], проверка работы которой в автоматизированном режиме подтвердила ее экономическую эффективность [20].

Таким образом, проблема повышения энергоэффективности ЭТК механизированной добычи нефти может быть решена относительно простыми средствами за счет разработки специализированных алгоритмов управления, направленных на оптимизацию по экономическому критерию режимов функционирования установок.

Выводы

1. Анализ технико-технологических решений в нефтедобывающей отрасли показывает, что основным направлением совершенствования ме-

ханизированной добычи нефти становится ее интеллектуализация, что определяет необходимость постановки и решения задачи разработки автоматических систем управления нефтедобычей в режиме реального времени.

2. Стратегия управления технологическим режимом работы скважины, разработанная на принципах системного подхода и направленная на минимизацию отклонения от планового значения экономического критерия, пригодна для оперативного решения задач повышения эффективности эксплуатации скважин при изменении технико-экономических условий как за счет выработки управляющих воздействий по регулированию режима работы скважины, так и за счет корректировки экономического критерия.
3. Имеющиеся в настоящее время технические средства, базы знаний и математические модели обеспечивают возможность практической реализации предложенной стратегии управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. BP Statistical Review of World Energy 2015. URL: <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> (дата обращения: 16.09.2016).
2. Фрай М.Е. Оценка современного состояния нефтяной промышленности России // Вестник Удмуртского университета. Серия «Экономика и право». – 2015. – № 2. – С. 75–85.
3. Последствия низких цен для нефтяной отрасли // Энергетический бюллетень. – Аналитический центр при правительстве РФ, 2015. – Выпуск № 20. – 31 с. URL: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/4547.pdf> (дата обращения: 26.09.2016).
4. Ивановский В.Н. Энергетика добычи нефти: основные направления оптимизации энергопотребления // Инженерная практика. – 2011. – № 6. – С. 18–26.
5. Скважинные насосные установки для добычи нефти / В.Н. Ивановский, В.И. Даришев, А.А. Сабиров, В.С. Кашта-

нов, С.С. Пекин. – М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. – 824 с.

6. Новые технологии и современное оборудование в электроэнергетике нефтегазовой промышленности / И.В. Белоусенко, Г.Р. Шварц, С.Н. Великий, М.С. Ершов, А.Д. Яризов. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. – 478 с.
7. Takacs G. Electrical Submersible Pumps Manual: Design, Operations, and Maintenance. – Oxford: Elsevier, 2009. – 440 p.
8. Зозуля Ю.И., Кизина И.Д., Алабужев В.А. Интеллектуальный нефтепромысел реального времени // Автоматизация и метрология в нефтегазовом комплексе: Матер. науч.-практ. конф. – Уфа: Нефтеавтоматика, 2007. – С. 26–28.
9. Modelling and Robustness Analysis of Model Predictive Control for Electrical Submersible Pump Lifted Heavy Oil Wells / D. Krishnamoorthy, E.M. Bergheim, A. Pavlov, M. Fredriksen, K. Fjalestad // IFAC – PapersOnLine. – 2016. – V. 49. – № 7. – P. 544–549.

10. Kladijev S. N., Slobodyan S. M., Pishchulin V. P. Automation of preparation of uranium solutions // *Tsvetn. Metall.* – 2014. – № 8. – P. 77–82.
11. Гаричев С.Н., Еремин Н.А. Технология управления в реальном времени. – М.: МФТИ, 2015. – Ч. 2. – 304 с.
12. Еремин Н.А., Еремин А.Н. Современное состояние и перспективы развития интеллектуальных скважин // *Нефть. Газ. Новации.* – 2015. – № 12 (183). – С. 51–55.
13. An automation system for gas-lifted oil wells: Model identification, control, and optimization / E. Camponogara, A. Plucenio, A.F. Teixeira, S.R.V. Campos // *Journal of Petroleum Science and Engineering.* – 2010. – V. 70. – P. 157–167.
14. Jia A., Guo J. Key technologies and understandings on the construction of Smart Fields // *Petroleum Exploration and Development.* – 2012. – V. 39. – P. 127–131.
15. Korovin I.S., Tkachenko M.G. Intelligent Oilfield Model // *Procedia Computer Science.* – 2016. – V. 101. – P. 300–303.
16. Study of the Intelligent Completion System for Liaohe Oil Field / Z. Huang, Yu. Li, Y. Peng, Z. Shen, W. Zhang, M. Wang // *Procedia Engineering.* – 2011. – № 15. – P. 739–746.
17. Ведерников В.А. Модели и методы управления режимами работы и электропотреблением погружных центробежных установок: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Тюмень, 2006. – 32 с.
18. Соловьев И.Г., Субарев Д.Н. Оптимизация подбора типоразмера и режима работы погружного насоса // *НТЖ «Вестник кибернетики».* – 2012. – № 11. – С. 3–8.
19. Sadov V.B., Plotnikova N.V. Application of Technical and Economic Criterion of Equipment Control with Sucker Rod Pump // *Procedia Engineering.* – 2015. – № 129. – P. 977–980.
20. Сипайлов В.А., Букреев В.Г., Сипайлова Н.Ю. Оптимальное управление установкой электроцентробежного насоса с частотно регулируемым асинхронным приводом // *Известия вузов. Электромеханика.* – 2009. – № 4. – С. 66–69.
21. Computer Simulation for Oil Wells with Artificial Lift Method by Electrical Submersible Pump / E.S. Batista, R.O. Costa, A.L. Maitelli, T.S. Barbosa, A.O. Salazar // *Computer Aided Chemical Engineering.* – 2009. – V. 27. – P. 393–398.
22. Боловин Е.В., Глазырин А.С. Метод идентификации параметров погружных асинхронных электродвигателей установок электроприводных центробежных насосов для добычи нефти // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 123–131.
23. Лаходынов В.С., Букреев В.Г. Синтез наблюдателя состояний для оценки частоты вращения погружного электродвигателя электроцентробежного насоса // *Технические и программные средства систем управления, контроля и измерений: Труды Российской конференции с международным участием.* – М., 2008. – С. 128–130.
24. Система оптимального управления установкой электроцентробежного насоса: пат. Рос. Федерация № 88167; заявл. 10.06.09; опубл. 27.10.09.

Поступила 02.03.2017 г.

Информация об авторах

Букреев В.Г., доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и электрооборудования Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Сипайлова Н.Ю., кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнических комплексов и материалов Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Сипайлов В.А., кандидат технических наук, заместитель начальника департамента технологического присоединения ОАО «Тюменьэнерго».

УДК 622.276.05:658.012

CONTROL STRATEGY IN ACCORDANCE WITH ECONOMICAL CRITERION FOR ELECTROTECHNICAL INSTALLATION OF MECHANIZED OIL PRODUCTION

Viktor G. Bukreev¹,
bukreev@tpu.ru

Nadezhda Yu. Sipaylova¹,
sny@tpu.ru

Vadim A. Sipaylov²,
Sipay@yandex.ru

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

² Tyumenenergo,
4, Universitetskaya street, Surgut, 628408, Russia.

The relevance of the paper is determined by the need to improve oil production and it is caused by geopolitical, economical and geological factors. The most important problem is to improve functional characteristics of mechanized oil production systems because of their high power consumption. Nowadays the idea of intelligent well technology is widely used to solve the problems at oil production. It is implemented by using control, information and telecommunication systems, and the adjustable equipment. When developing control system it is necessary to provide achievement of global result such as the cost reduction of oil production. Therefore, it is necessary to apply the principles of system approach, and economic criteria to estimate system efficiency.

The main purpose of the research is to improve functioning of electrotechnical installations of mechanized oil production using the system approach to control.

The methods used in the study: the systemic analysis of tendencies in using control, information technologies and the adjustable equipment in oil production industry; synthesis of technical and economic decisions; methods of mathematical modeling.

The results. The authors have developed the strategy of controlling the electrotechnical installation operating modes in mechanized oil production. It allows optimizing oil production in real time as economically effective one.

Conclusion. The modern potential of information technologies and adjustable oil production equipment is not fully used. The contradiction between opportunities of such equipment and their real using can be overcome by application of system approach to control the installations where economic criteria are the main indicators of effective functioning of the systems.

Key words:

Mechanized oil production, electrotechnical installation, electric submersible pump, control, energy efficiency, economical criterion.

REFERENCES

- BP Statistical Review of World Energy 2015. Available at: <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> (accessed: 16 September 2016).
- Fray M.E. Assessment of the current state of Russian oil industry. *Ekonomika i pravo*, 2015, no. 2, pp. 75–85. In Rus.
- Posledstviya nizkih tsen dlya neftyanoy otrasli [Consequences of low prices for oil branch]. *Energeticheskiy byulleten*, 2015, no. 20. Available at: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/4547.pdf> (accessed: 26 September 2016).
- Ivanovskiy V.N. Energetika dobyichi nefiti: osnovnye napravleniya optimizatsii energopotrebleniya [Oil production power: main trends of energy consumption]. *Inzhenernaya praktika*, 2011, no. 6, pp. 18–26.
- Ivanovskiy V.N., Darishev V.I., Sabirov A.A., Kashtanov B.C., Pekin S.S. *Skvazhinnye nasosnye ustanovki dlya dobyichi nefiti* [Well electrical pumps for oil production]. Moscow, Gubkin Russian State University of Oil and Gas Press, 2002. 824 p.
- Belousenko I.V., Shvarts G.R., Velikiy S.N., Ershov M.S., Yarizov A.D. *Novye tekhnologii i sovremennoe oborudovanie v elektroenergetike neftegazovoy promyshlennosti* [New technologies and modern equipment in power industry of oil and gas branch]. Moscow, Nedra-Biznestsentr Publ., 2007. 478 p.
- Takacs G. *Electrical Submersible Pumps Manual: Design, Operations, and Maintenance*. Oxford, Elsevier, 2009. 440 p.
- Zozulya Yu.I., Kizina I.D., Alabuzhev V.A. Intellektualny neftepromysel realnogo vremeni [Intelligent oil field of real time]. *Avtomatizatsiya i metrologiya v neftegazovom komplekse: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Scientific Conference. Automation and metrology in an oil and gas industry]. Ufa, 2007. pp. 26–28.
- Krishnamoorthy D., Bergheim E.M., Pavlov A., Fredriksen M., Fjalestad K. Modelling and Robustness Analysis of Model Predictive Control for Electrical Submersible Pump Lifted Heavy Oil Wells. *IFAC – PapersOnLine*, 2016, vol. 49, no. 7, pp. 544–549.
- Kladiev S.N., Slobodyan S.M., Pishchulin V.P. Automation of preparation of uranium solutions. *Tsvetnye Metally*, 2014, no. 8, pp. 77–82.
- Garichev S.N., Eremin N.A. *Tekhnologiya upravleniya v realnom vremeni* [Real time technology control]. Moscow, MFTI Press, 2015. 304 p.
- Eremin N.A., Eremin A.N. Modern state and prospects of intelligent wells development. *Neft. Gaz. Novatsii*, 2015, no. 12 (183), pp. 51–55. In Rus.
- Camponogara E., Plucenio A., Teixeira A.F., Campos S.R.V. An automation system for gas-lifted oil wells: Model identification, control, and optimization. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, vol. 70, pp. 157–167.
- Jia A., Guo J. Key technologies and understandings on the construction of Smart Fields. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, vol. 39, pp. 127–131.

15. Korovin I.S., Tkachenko M.G. Intelligent Oilfield Model. *Procedia Computer Science*, 2016, vol. 101, pp. 300–303.
16. Huang Z., Li Yu., Peng Y., Shen Z., Zhang W., Wang M. Study of the Intelligent Completion System for Liaohe Oil Field. *Procedia Engineering*, 2011, no. 15, pp. 739–746.
17. Vedernikov V.A. *Modeli i metody upravleniya rezhimami raboty i elektropotrebleniem pogruzhnykh tsentrobezhnykh ustanovok. Dis. Dokt. nauk* [Models and methods to control operation modes and power consumption of electrical submersible pumps. Dr. Diss.]. Tyumen, 2006. 32 p.
18. Solovev I.G., Subarev D.N. Optimizatsiya podbora tiporazmera i rezhima raboty pogruzhnogo nasosa [Optimization of choice of a standard size and operation mode of the submersible pump]. *Vestnik kibernetiki*, 2012, no. 11, pp. 3–8.
19. Sadov V.B., Plotnikova N.V. Application of Technical and Economic Criterion of Equipment Control with Sucker Rod Pump. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 129, pp. 977–980.
20. Sipaylov V.A., Bukreev V.G., Sipaylova N.Yu. Optimum control of the electrical submersible pump with adjustable-frequency induction drive. *Elektromekhanika*, 2009, no. 4, pp. 66–69.
21. Batista E.S., Costa R.O., Maitelli A.L., Barbosa T.S., Salazar A.O. Computer Simulation for Oil Wells with Artificial Lift Method by Electrical Submersible Pump. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2009, vol. 27, pp. 393–398.
22. Bolovin E.V., Glazyirin A.S. Method for identifying parameters of submersible induction motors of electrical submersible pump units for oil production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets engineering*, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 123–131. In Rus.
23. Lakhodynov V.S., Bukreev V.G. Sintez nablyudatelya sostoyaniy dlya otsenki chastoty vrashcheniya pogruzhnogo elektrodvigatelya elektrosentrobezhnogo nasosa [Synthesis of the observer to value the rotation frequency of the electric motor for submersible pump]. *Tekhnicheskie i programmnye sredstva sistem upravleniya, kontrolya i izmereniy. Trudy Rossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Technical and software tools of control, regulation and measurement. Proc. Russian conference with International participation]. Moscow, 2008. pp. 128–130.
24. Sipaylov V.A., Bukreev V.G., Sipaylova N.Yu. *Sistema optimalnogo upravleniya ustanovkoy elektrosentrobezhnogo nasosa* [System of optimum control of electric submersible pump]. Patent RF, no. 88167, 2009.

Received: 2 March 2017.

Information about the authors

Viktor G. Bukreev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Nadezhda Yu. Sipaylova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vadim A. Sipaylov, Cand. Sc., deputy director, Tyumenenergo.

УДК 69.058.8

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ ДЛЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СООРУЖЕНИЙ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

Однокопылов Георгий Иванович¹,
OGIz@yandex.ru

Саркисов Дмитрий Юрьевич²,
Milandd@yandex.ru

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

² Томский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Актуальность работы обусловлена тем, что в последние годы все чаще возникает необходимость проектирования железобетонных конструкций объектов нефтегазового комплекса, на которые возможно воздействие интенсивных кратковременных динамических нагрузок аварийного типа, носящих ударно-волновой характер. Опасность действия на строительные конструкции зданий и сооружений ударных волн возрастает вследствие возможных взрывов, аварийного падения тяжелых грузов, террористических актов, природных и техногенных катастроф и т. д. Возникающие при этом специфические нагрузки часто вызывают значительные повреждения строительных конструкций, и даже их полное или частичное разрушение, которое может привести к травмам и гибели людей, а также порче дорогостоящего оборудования и, следовательно, значительным материальным затратам. Кроме того, повреждения строительных конструкций ответственных зданий и сооружений нефтегазового комплекса приводят к остановке технологического процесса, что в ряде случаев не только экономически не выгодно, но и недопустимо.

Цель: разработка методики оценки разрушающей нагрузки при ударно-волновом нагружении для ответственных строительных конструкций сооружений нефтегазового комплекса.

Методы исследования: измерения нагрузки и опорных реакций методами тензометрии, графоаналитический метод исследования с применением программы Microsoft Excel, численное интегрирование методом Симпсона.

Результаты. Разработана методика оценки параметров разрушающей нагрузки ударно-волнового характера для ответственных строительных конструкций сооружений нефтегазового комплекса с применением мгновенных и усредненных значений коэффициентов результирующей силы. На примере конкретного испытания изгибаемого железобетонного элемента на кратковременную динамическую нагрузку получены мгновенные и усредненные значения коэффициентов результирующей силы.

Ключевые слова:

Коэффициент результирующей силы, кратковременное динамическое нагружение, ударно-волновое нагружение, железобетон, опорные реакции, экспериментальные исследования.

Актуальность исследований

При технической эксплуатации любого ответственного объекта нефтегазового комплекса всегда существует повышенная вероятность возникновения серьезных чрезвычайных ситуаций, аварий, инцидентов, а также несчастных случаев, в том числе с летальным исходом.

В нефтегазовой сфере подобные ситуации, как правило, проявляются в форме разрушений или повреждений зданий и сооружений, а также технологического оборудования. Происходит это обычно из-за взрывных процессов и последующих выбросов горячих и токсичных веществ, которые зачастую не поддаются контролю.

Основными техническими причинами аварий в этой сфере можно считать: повреждения и дефекты в конструкциях зданий, технические проблемы с оборудованием, отклонения от проектных решений в процессе строительства и монтажа опасного производственного объекта, высокий износ оборудования, недостаточный уровень внедрения новых технологий, низкое оснащение производства автоматическими си-

стемами, активность коррозионных процессов, низкий уровень средств оперативной связи и сигнализации.

По данным Ростехнадзора причинами практически двух третей всех чрезвычайных происшествий, аварий, инцидентов и несчастных случаев на опасных производственных объектах нефтяной и газовой отрасли являются факторы, которые относятся к техническим.

Следовательно, повышенное внимание при проектировании объектов данной отрасли следует уделять совершенствованию методов расчета и анализу напряженно-деформированного состояния строительных конструкций зданий и сооружений при воздействии кратковременных динамических нагрузок аварийного характера.

При анализе разрушающих кратковременных динамических воздействий, необходимом для выработки оптимальных конструктивных решений зданий и сооружений, существуют трудности по определению параметров приложенной нагрузки и выявлению истинных коэффициентов запаса прочности конструкций.

Известные методы оценки для статической нагрузки хорошо проработаны, при действии кратковременных динамических нагрузок при оценке всех параметров должно быть учтено время воздействия, а следовательно, необходимо осуществлять контроль изменения всех факторов с течением времени, что накладывает определенные сложности на применение стандартных методов, используемых при статических нагружениях [1–5].

При проведении практически любых испытаний на динамическую нагрузку (взрывное, ударное, сейсмическое) предполагается наличие узлов входного и выходного контроля параметров действующей нагрузки. Как правило, это различные силоизмерители тензометрического типа.

В работе предложена методика оценки параметров разрушающей нагрузки при ударно-волновом нагружении для ответственных строительных конструкций. В качестве примера рассмотрено испытание изгибаемого железобетонного элемента при действии кратковременной динамической нагрузки.

Известно, что процессы, происходящие в железобетоне при кратковременных динамических воздействиях, достаточно сложны [6–12], и для их понимания необходимо проведение экспериментальных исследований, более того, необходимо разрабатывать и апробировать достоверные способы обработки и интерпретации полученных данных. Такие способы должны быть воспроизводимы и применимы при проведении испытаний конструкций с различными динамическими параметрами.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования железобетонных изгибаемых элементов по схеме однопролетной шарнирно-опертой балки на действие кратковременной динамической нагрузки были произведены на основе копровой установки. Общий вид стенда приведен на рис. 1.

Для измерения силовых параметров при испытаниях использовались датчики силоизмерительные тензорезистивные типа ДСТ4126 с максимальным измеряемым усилием при статическом нагружении до 2000 кН (при динамическом нагружении до 200 кН), контроль давлений осуществлялся месдозами – 2 шт.

Датчик для измерения нагрузки, приходящей от падающего груза, устанавливался по центру распределительной траверсы сверху образца. С целью увеличения времени действия нагрузки на датчик сверху устанавливался комплект резиновых прокладок (их наличие, толщина и количество обусловлено целями конкретного исследования). Датчики для измерения опорных реакций устанавливались попарно в каждую из специально сконструированных опор. Общий вид силоизмерительного датчика и опоры приведен на рис. 2.

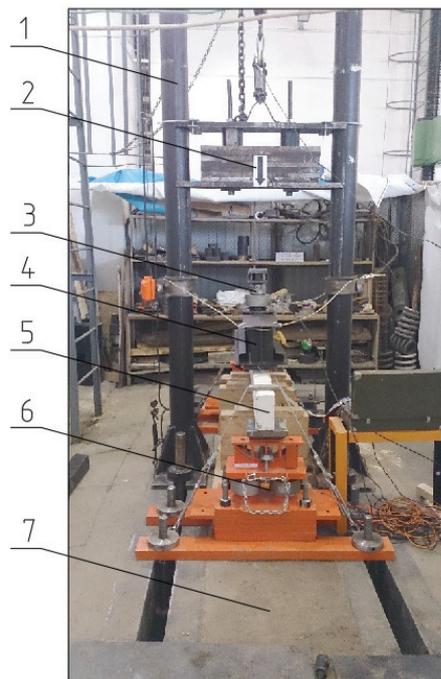


Рис. 1. Общий вид стенда для испытаний: 1 – копровая установка; 2 – груз массой 430 кг; 3 – силоизмеритель; 4 – распределительная траверса; 5 – экспериментальный образец; 6 – опора; 7 – силовое поле

Fig. 1. General view of the stand for tests: 1 is the pile driver installation; 2 is the 430 kg weight; 3 is the dynamometer; 4 is the distribution traverse; 5 is the experimental sample; 6 is the support; 7 is the reinforced floor

Для регистрации показаний датчиков в процессе экспериментального исследования использовалась сертифицированная измерительная система МПС-036, все силоизмерительные датчики были подключены к ней через специальные, имеющие защиту от помех, провода, что обеспечивало необходимую точность при синхронизации данных со всех датчиков во времени. Также при выполнении опытов был задействован комплекс приборов и датчиков, которые обычно используются при проведении экспериментальных исследований железобетонных элементов на кратковременную динамическую нагрузку [13–15].

Анализ экспериментальных данных

После проведения эксперимента зарегистрированные данные со всех силоизмерительных датчиков преобразовывались в формат Microsoft Excel, построение графиков и их дальнейшая обработка производились в данной программе.

Исходные графики с обрезанными начальными и конечными участками приведены на рис. 3. На всех графиках силоизмерительный датчик на траверсе (сверху) обозначен С-5, силоизмерительные датчики в опорах обозначены С-1, С-2 и С-3, С-4 соответственно.

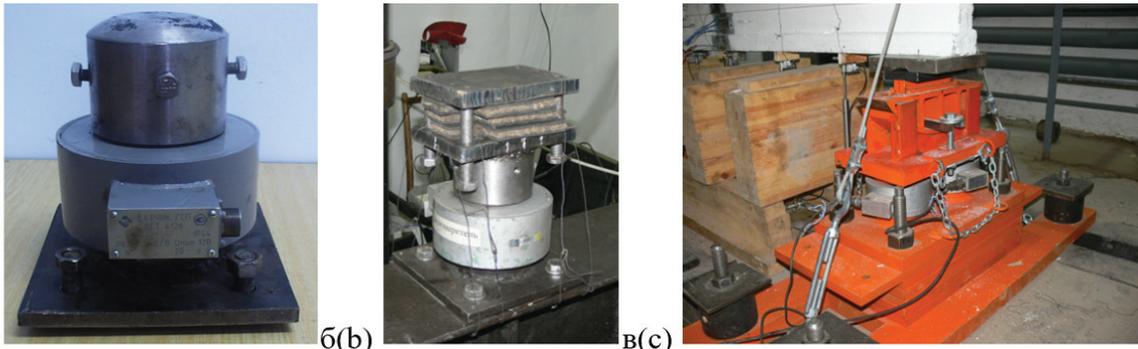


Рис. 2. Общий вид силоизмерительного оборудования: а) силоизмеритель (динамометр); б) силоизмеритель для измерения нагрузки; в) конструкция для измерения опорных реакций в сборе

Fig. 2. General view of the force measuring equipment: a) dynamometer; b) dynamometr to measure the load; c) unit for measuring assembly support reactions

Первичный анализ полученного графика показал (рис. 3):

- по форме график нагрузки (силомер С-5) имеет два выраженных пика, характеризующих падение груза, его отскок и повторное падение (данный эффект явно просматривается при воспроизведении видеозаписи эксперимента в замедленном действии);
- графики опорных реакций по форме не имеют двух ярко выраженных пиков, хотя они просматриваются на кривых С-1 и С-4;
- максимальная кратковременная динамическая нагрузка составила 65,116 кН, максимальное значение было достигнуто за 5,15 мс;
- максимальные значения по графикам опорных реакций составили 19,907 кН (С-1), 16,671 кН (С-2), 17,651 кН (С-3) и 15,298 кН (С-4);
- разброс в максимальных значениях четырех опорных силоизмерительных датчиков не превышает 23,15 %;
- сумма максимальных значений опорных реакций составляет 69,527 кН, что больше, чем пик нагрузки, который составляет 65,116 кН, однако такое сопоставление не совсем корректно, так как пики опорных реакций по графикам (С1–С4) наступают в разные моменты времени и с отстройкой (запаздыванием) относительно пика графика С-5;

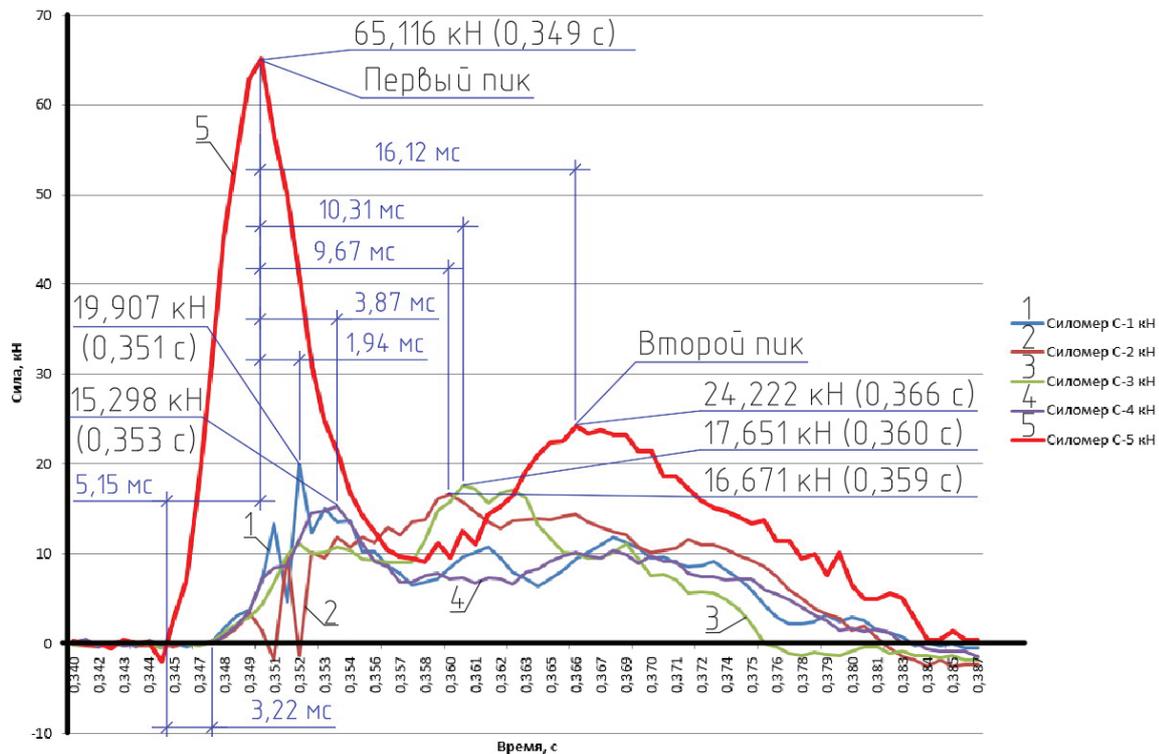


Рис. 3. Исходные графики зависимости нагрузки и опорных реакций от времени

Fig. 3. Baseline graphs of loads and support reactions time dependence

- запаздывание максимальных пиков графиков опорных реакций относительно максимального пика по графику нагрузки составили (мс): 1,94 (С-1); 9,67 (С-2); 10,31 (С-3) и 3,87 (С-4);
- так как датчики С-1 и С-2 были установлены в одной опоре, а датчики С-3 и С-4 – в другой, то по достижению пиков можно предположить некоторое «заваливание» конструкции в одну сторону (влево), а затем выравнивание и достижение пиковых реакций на правых датчиках опор;
- разница во времени между двумя пиками (удар и повторный удар после отскока) для графика нагрузки (С-5) составила 16,12 мс;
- ко времени достижения второго пика на графике нагрузки (С-5) по всем датчикам опорных реакций уже были достигнуты пиковые значения, однако пики реакций по датчикам С-2 и С-3 были достигнуты уже после отскока груза (прохождения промежуточного минимума на графике нагрузки С-5);
- общее время действия кратковременной динамической нагрузки составило около 42,24 мс, время действия первого (однократного) удара составило 13,536 мс.

Далее для сопоставления действующей кратковременной динамической нагрузки с опорной реакцией в каждый момент времени был построен суммарный график опорной реакции (сумма показаний четырех датчиков опор в каждый отсчет времени). Данный график представлен на рис. 4.

В результате анализа данного графика можно отметить:

- суммарный график опорных реакций (сумма показаний С1–С4) имеет три выраженных пика;
- первый пик 51,484 кН соответствует области 1 на графике, то есть области достижения максимальных реакций в датчиках С-1 и С-4;
- второй пик 50,406 кН соответствует области 2 на графике, то есть области достижения максимальных реакций в датчиках С-2 и С-3;
- третий пик 44,816 кН вероятно возникает вследствие повторного удара груза после отскока;
- первый пик на суммарном графике опорных реакций отмечен через 3,87 мс после пика на графике нагрузки (С-5), второй пик на том же графике – через 10,31 мс, запаздывание между двумя пиками оставило 6,44 мс;
- запаздывание между пиками нагрузки и суммарной опорной реакции после повторного удара груза составило 1,93 мс, что меньше, чем запаздывание между первыми пиками нагрузки и суммарной опорной реакции, – 3,87 мс и меньше, чем запаздывание между началом действия нагрузки и опорных реакций, – 3,22 мс (рис. 3);
- таким образом, из предыдущего заключения следует, что величина запаздывания опорной реакции относительно действующей нагрузки при кратковременном динамическом воздей-

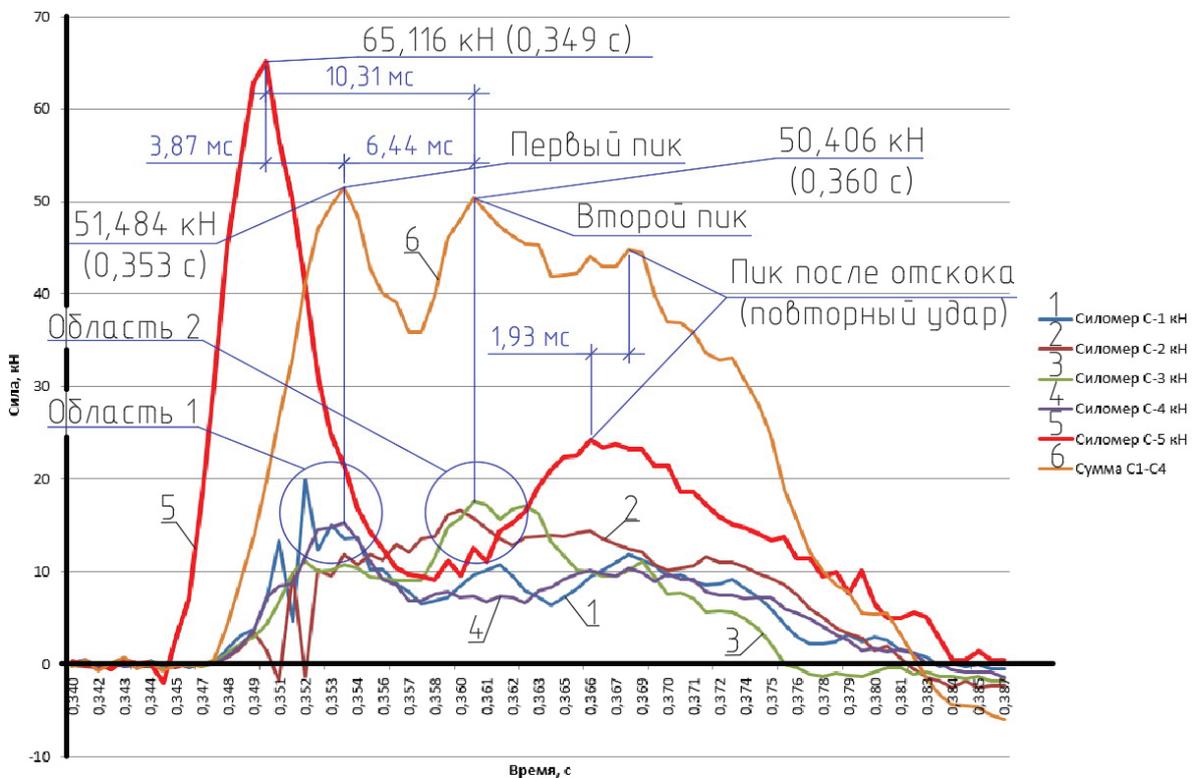


Рис. 4. График зависимости нагрузки и суммарной опорной реакции

Fig. 4. Dependence graph of the total load and support reaction

ствии не является величиной постоянной, а вначале возрастает (от 3,22 до 3,87 мс), а затем падает (от 3,87 до 1,93 мс). Вероятно, такой эффект объясняется изменением скорости нагружения в процессе кратковременного динамического воздействия;

- сравнения абсолютных максимальных значений на графиках нагрузки (65,116 кН) и суммарной опорной реакции (51,484 кН) показывает, что пик нагрузки превышает пик суммарной опорной реакции на 20,93 %, такое сопоставление опять же видится не совсем корректным, так как на графике суммарной опорной реакции имеется еще и второй сопоставимый по величине с первым (50,406 кН) пик;
- суммирование двух пиков с графика суммарной опорной реакции и сравнение этой величины со значением пика нагрузки тоже не даст удобных для анализа результатов, в следствие чего логичным выглядит сравнение площадей под графиками кратковременной динамической нагрузки и суммарной опорной реакции.

Следует отметить, что на каждом конечном интервале времени площади под графиками выражают импульс силы и импульс опорной реакции в соответствующей размерности Н*с. В дальнейшем в работе все величины переводятся в относительные значения, при этом предлагаемый подход к анализу графиков не включает оценку величины массы груза и его начальных и конечных скоростей. Целью является нахождение площадей под графиками

ми аналитическим или графическим способом и их сопоставление в относительных единицах, что в итоге дает безразмерный коэффициент.

Перед нахождением площадей, ограниченных графиками и осью времени, были скорректированы начальные и конечные участки графиков. Также можно было вывести в ноль ось времени, но этого сделано не было для удобства сравнения с предыдущими результатами.

Площади, ограниченные графиками и осью времени, определялись путем численного интегрирования методом Симпсона (методом парабол). Расчеты выполнялись в программе Microsoft Excel.

На рис. 5 приведены графики с выделением площадей и численными значениями, а также отклонением площадей графиков кратковременной динамической нагрузки и суммарной опорной реакции.

Выполненные расчеты показали:

- площадь графика кратковременной динамической нагрузки составляет 1,495 Н*с;
- площадь графика суммарной опорной реакции составляет 2,226 Н*с;
- отклонение между площадями, ограниченными графиками и осью времени, составляет 32,839 % в пользу графика суммарной опорной реакции;
- такой эффект может объясняться тем, что датчик С-5 (для определения кратковременной динамической нагрузки) при эксперименте был расположен сверху экспериментального образ-

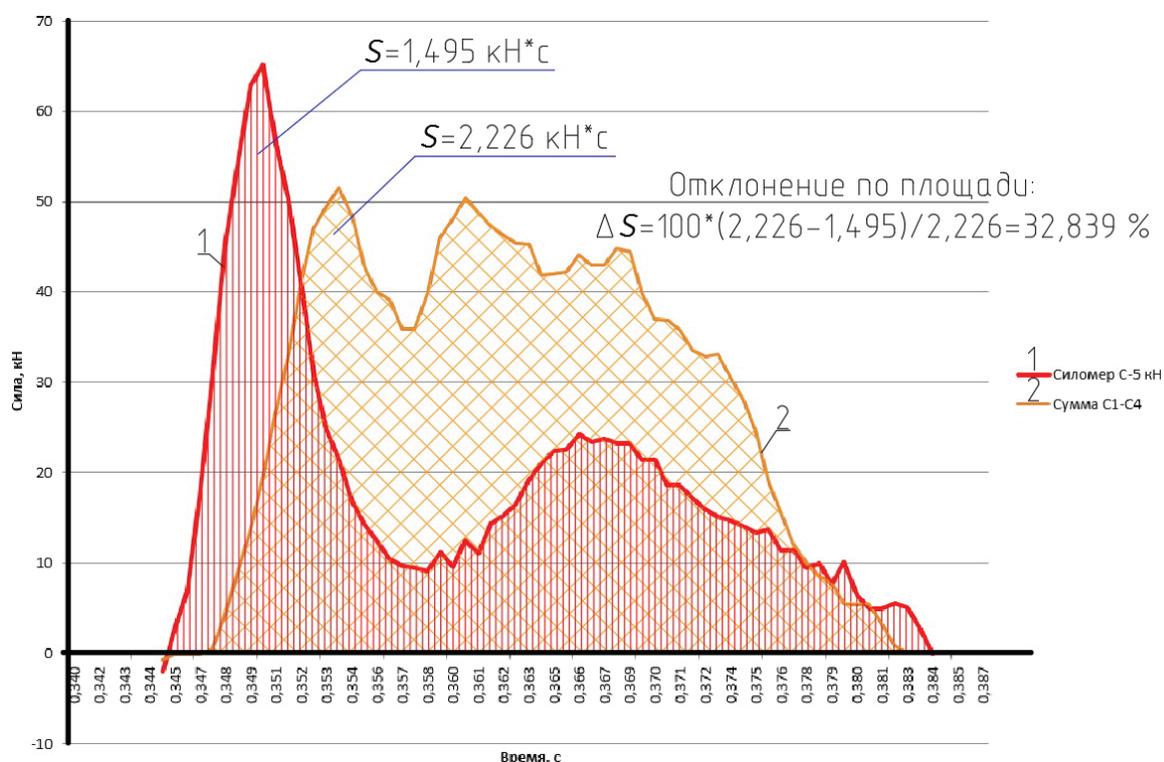


Рис. 5. Графики развития кратковременной динамической нагрузки и суммарной опорной реакции во времени. Нахождение площадей под графиком

Fig. 5. Graphs of transient dynamic loads and the total reaction time reference. Finding area is under graphs

ца и распределительной траверсы и показывал величину нагрузки от падения груза массой 430 кг с высоты 0,5 м, а датчики для определения опорных реакций располагались в специально сконструированных опорах снизу и следовательно на их показания оказывали влияния силы инерции от веса силомера С-5, распределительной траверсы и самого экспериментального образца, возникающие в момент удара груза. Нужно учесть, что вес железобетонного образца, распределительной траверсы и датчика С-5 суммарно около 100 кг, что составляет около 25 % от массы падающего груза (435 кг). Кроме того, часть энергии удара должна расходоваться на деформирование самого образца, а часть – на выделение тепла. Также нельзя исключать влияние на показания датчиков шумов от перемещения опорных пластин и других металлических элементов стенда.

Для обеспечения достоверности выводов, необходимо проведение экспериментальных исследований, исключающих отскок образца, и соответственно анализ данных, полученных при чистом однократном ударе груза. Такие исследования технически более сложны, но их можно провести, если собрать экспериментальный стенд, например, по патенту [16].

В связи с этим для дальнейшей обработки полученных в настоящем исследовании результатов из графиков, представленных на рис. 5, были выделены фрагменты, соответствующие однократному удару, при этом «конечный участок» графика суммарной опорной реакции был аппроксимирован численно. Кроме того, для удобства анализа временная шкала была представлена в мс, а шкала силы переведена в относительные величины путем деления каждого показания всех датчиков на максимальную зафиксированную нагрузку в 65,116 кН.

Из литературных источников, например [17–20], известно, что при кратковременном динамическом нагружении прочность железобетонных конструкций выше, чем при статическом нагружении, что объясняется изменением физико-механических характеристик бетона и арматуры по сравнению со статическим состоянием. При кратковременном динамическом нагружении происходит неравномерное развитие и определенное запаздывание деформаций по сравнению с результатами статических испытаний [21, 22].

Экспериментальные исследования показывают, что также имеет место запаздывание опорных реакций относительно действующей нагрузки, это приводит к смещению по времени друг относительно друга пиковых значений кратковременной динамической нагрузки и опорных реакций.

Методика оценки параметров разрушающей нагрузки

Несмотря на то, что, согласно принципу Даламбера, система при кратковременном динамическом нагружении в любой момент времени находится в

равновесии за счет действия сил инерции, для понимания и корректной оценки результатов экспериментальных исследований, а также обоснования момента наступления предельного состояния в конструкции по зарегистрированным данным необходимо учитывать время запаздывания, а если учесть, что запаздывание во время динамического воздействия не является постоянной величиной, то необходим подход для постоянного отслеживания соотношения значений действующей нагрузки и опорных реакций в процессе динамического воздействия. Такой величиной может служить результирующая сила в каждый момент времени. Под результирующей силой понимается разность между мгновенным значением силы (по показанию силоизмерителя, установленного сверху образца) и суммой мгновенных значений опорных реакций (по показаниям датчиков опорных реакций, установленных снизу образца).

В результате обработки данных проведенного экспериментального исследования получают: мгновенные значения силы приложенного сверхнормативного ударного воздействия по показаниям силоизмерителя – $q_s(t)$ и мгновенные значения показаний каждого из n датчиков опорной реакции – $q_{op,i}(t)$ на интервале времени от t_1 до t_2 (время начала и окончания ударного воздействия).

Нужно отметить, что для регистрации значений сверхнормативной кратковременной динамической нагрузки обычно необходимо и достаточно одного силоизмерителя, а для фиксации значений опорных реакций может использоваться любое четное число датчиков (для линейных конструкций при двух опорах).

Для удобства работы с величинами результирующей силы необходимо перевести ее значения в относительные единицы и таким образом получить мгновенные и усредненные значения коэффициентов результирующей силы. Перевод в относительные величины необходим также для использования данных при сопоставительном анализе с результатами серии аналогичных испытаний.

Для перевода полученных данных в относительные величины каждое из мгновенных значений $q_s(t)$ и $q_{op,i}(t)$ делится на q_{smax} – максимальное значение силы приложенного сверхнормативного ударного воздействия по показаниям силоизмерителя.

Определение мгновенного значения коэффициента результирующей силы $k(t)$ производится путем нахождения разности между мгновенным значением силы и суммой мгновенных значений n датчиков опорных реакций, деленной на максимальное значение силы, т. е.:

$$k(t) = \frac{q_s(t) - \sum_{i=1}^n q_{op,i}(t)}{q_{smax}}$$

Определение усредненного значения коэффициента результирующей силы k на временном интервале от t_1 до t_2 производится путем нахождения разности между площадью, ограниченной графика-

ком силы с временной осью, и площадью, ограниченной графиком суммарной опорной реакции с временной осью, деленной на площадь, ограниченную графиком силы с временной осью, т. е.:

$$k = \frac{\int_{t_1}^{t_2} q_s(t)dt - \sum_{i=1}^n \int_{t_1}^{t_2} q_{op,i}(t)dt}{\int_{t_1}^{t_2} q_s(t)dt}.$$

В выше обозначенных формулах: $k(t)$ – мгновенное значение коэффициента результирующей силы в строительной конструкции при ударном разрушении; k – усредненное значение коэффициента результирующей силы в строительной конструкции при ударном разрушении на интервале времени t_1-t_2 ; t_1, t_2 – времена начала и окончания

ударного воздействия; n – число датчиков опорных реакций при испытаниях; $q_s(t)$ – мгновенное значения кратковременной динамической нагрузки при сверхнормативном ударном воздействии по показаниям силоизмерителя; $q_{op,i}(t)$ – мгновенное значение показания i -го датчика опорной реакции; q_{smax} – максимальное значение динамической нагрузки приложенного сверхнормативного ударного воздействия по показаниям силоизмерителя.

На рис. 6 приведены графики зависимости относительных значений кратковременной динамической нагрузки и суммарной опорной реакции от времени при однократном ударе, а также график изменения значений коэффициента результирующей силы в процессе испытания.

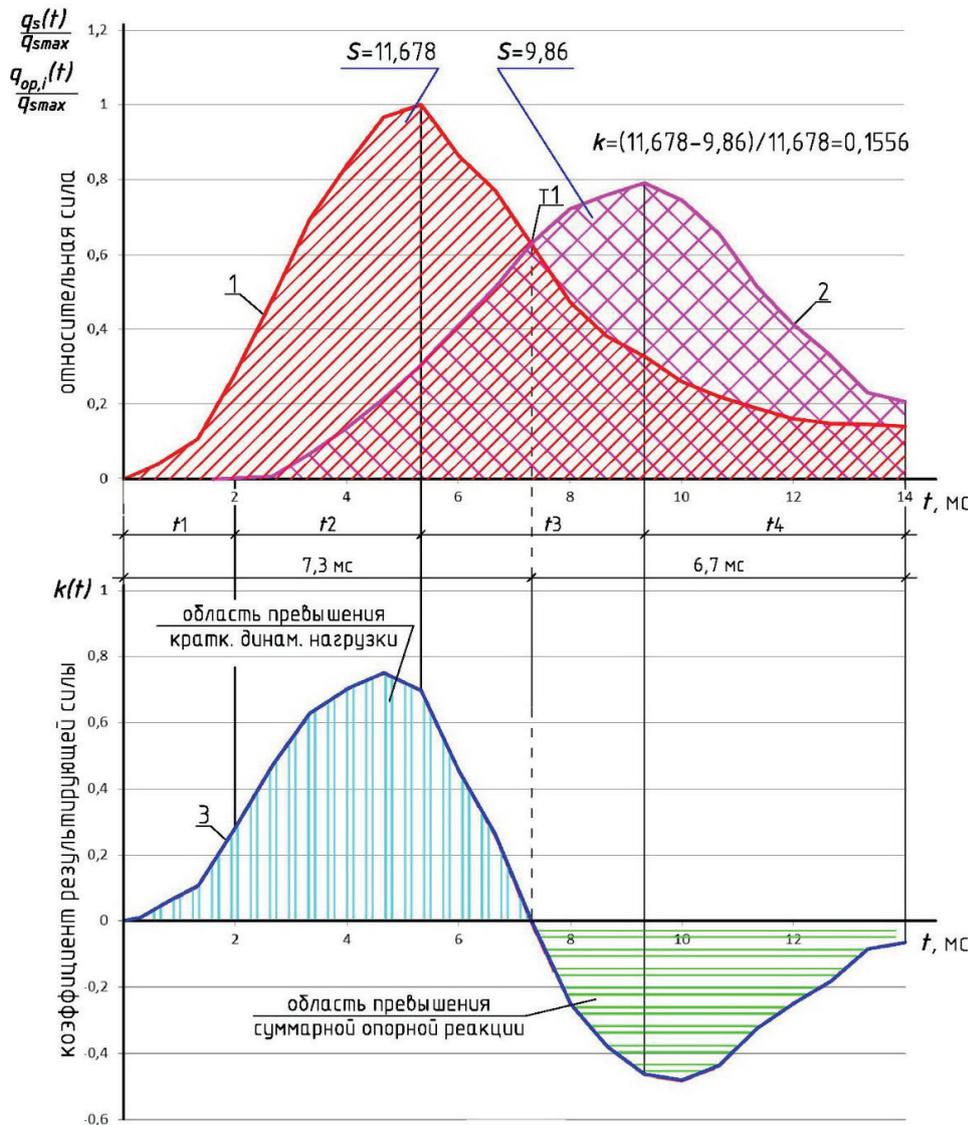


Рис. 6. 1 – график зависимости относительной кратковременной динамической нагрузки от времени; 2 – график зависимости относительной суммарной опорной реакции от времени; 3 – график зависимости от времени значений коэффициента результирующей силы

Fig. 6. 1 – graph of the relative short-term dynamic load versus time; 2 – graph of the relative total response versus time; 3 – graph of the resultant force factor versus time

На представленных графиках можно выделить четыре характерных временных интервала t_1-t_4 , а также характерную точку «статического» равновесия – t_1 . В данный момент времени кратковременная динамическая нагрузка равна по величине суммарной опорной реакции.

- t_1 – временной интервал запаздывания опорной реакции относительно кратковременно динамической нагрузки (зависит в основном от скорости нагружения);
- t_2 – временной интервал развития в экспериментальном образце вначале упругих, а затем пластических деформаций;
- t_3 – временной интервал, характеризующий время разрушения образца (временной участок, на котором деформации бетона достигают своих предельных значений, а напряжения в арматуре достигают предела текучести);
- t_4 – временной интервал значительного развития пластических деформаций.
- t_1 – точка, характеризующая момент равенства значений кратковременной динамической нагрузки и суммарной опорной реакции.

При действии на железобетонный элемент кратковременных динамических нагрузок процессы развития опорных реакций, прогибов, деформаций бетона и арматуры происходят с некоторым запаздыванием относительно развития нагрузки, к тому же, как показывает анализ полученных графиков, запаздывание – величина непостоянная во времени. Величина запаздывания может зависеть от многих факторов: скорости деформирования (массы падающего груза, высоты падения, начальной скорости и ускорения), жесткости балки (качества и вида всех составляющих бетона, качества подготовки бетонной смеси, технологии бетонирования, условий твердения, класса и вида арматуры, процента армирования, схемы расположения ее по сечению и др.), параметров окружающей среды (температура, давление, влажность и др.). Учет всех многочисленных факторов, оказывающих влияние на протекание процесса, не представляется возможным, к тому же все условия слабо воспроизводимы при повторных испытаниях, следовательно, выбор для сопоставительного анализа результатов испытаний, характерного временного момента, когда нагрузка и опорная реакция равны по значению представляется интересным.

Для представленного в качестве примера испытания значения мгновенного коэффициента результирующей силы изменяются в пределах от +0,75 до –0,48. При этом знак «+» показывает превышение нагрузки над опорной реакцией, а знак «–» – наоборот.

Усредненное значение коэффициента результирующей силы, по сути, равно разнице между площадями, ограниченными графиками 1 и 2 и временной осью, на рис. 8. Для представленного в качестве примера испытания площадь под графиком 1 составляет 11,678, а площадь под графиком 2 – 9,86. Усредненный коэффициент резуль-

тирующей силы составляет 0,1556, полученное значение показывает долю энергии, затраченную на деформирование материала и выделение тепла в процессе испытания строительной конструкции на кратковременную динамическую сверхнормативную нагрузку.

Для получения абсолютных значений разности между мгновенными показаниями силоизмерителя и суммарной опорной реакции необходимо помножить мгновенное значение коэффициента результирующей силы $k(t)$ на максимальное значение силы приложенного сверхнормативного ударного воздействия по показаниям силоизмерителя q_{smax} .

Для получения абсолютного значения разности площадей под графиками 1 и 2 на рис. 8 необходимо помножить усредненное значение коэффициента результирующей силы k на абсолютное значение площади под графиком 1.

Использование приведенного подхода к анализу графиков кратковременной динамической нагрузки и графиков опорных реакций позволяет получить качественную и количественную картину о развитии силового фактора в процессе кратковременного динамического воздействия на изгибаемый железобетонный элемент.

Построение графика отношения значений нагрузки к опорной реакции с течением времени позволяет получить характерные точки и участки, описывающие процессы «перетекания» нагрузки в опорную реакцию конструкции в процессе динамического воздействия. График отношения значений (мгновенные и усредненные значения коэффициентов результирующей силы) может быть полезен, например, при разработке и проектировании податливых опор для смягчения динамического воздействия на железобетонные конструкции при сейсмических, аварийных ударных или взрывных воздействиях [2, 7].

Для получения полных данных о процессах, происходящих в ходе кратковременного динамического воздействия на железобетонный элемент, необходимо провести сопоставление полученных результатов с результатами детального анализа графиков зависимости от времени деформаций бетона, арматуры, прогибов и ускорений образца.

Разработанная методика может быть применена для оценки параметров разрушающей нагрузки ударно-волнового характера различных классов строительных конструкций, а также при различных временных интервалах ее действия. При этом существуют ограничения в применении представленной методики, основанные на необходимости наличия входного датчика силы и выходных датчиков опорных реакций.

Выводы

1. Впервые предложена методика оценки параметров разрушающей нагрузки при ударно-волновом нагружении для ответственных строительных конструкций сооружений нефтегазо-

вого комплекса с применением мгновенных и усредненных значений коэффициентов результирующей силы.

2. На примере конкретного испытания изгибаемого железобетонного элемента на кратковре-

менную динамическую нагрузку получены мгновенные и усредненные значения коэффициентов результирующей силы, которые составили соответственно $k(t) = +0,75...-0,48$, $k=0,1556$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности разрушения железобетонных конструкций при динамическом нагружении / В.С. Плевков, А.В. Радченко, И.В. Балдин, П.А. Радченко, М.Е. Гончаров, С.П. Батуев // Вестник Тамбовского Университета. – 2013. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 1578–1579.
2. Кумпяк О.Г., Галаяудинов З.Р., Кокорин Д.Н. Прочность и деформативность железобетонных конструкций на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении: монография. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2016. – 272 с.
3. Tensile behavior of concrete under high loading rates / J. Ozbolt, A. Sharma, B. Irhan et al. // Int. J. of Impact Eng. – 2014. – V. 69. – № 5. – P. 55–68.
4. Strain rate dependent tensile behavior of advanced high strength steels / J.H. Kim, D. Kim, Han Heung Nam et al. // Materials Science & Engineering A. – 2013. – № 559. – P. 222–231.
5. Shang, S., Song Y. Dynamic biaxial tensile-compressive strength and failure criterion of plain concrete // Construction and Building Materials. – 2013. – V. 40. – № 2. – P. 322–329.
6. Кумпяк О.Г., Копаница Д.Г. Прочность и деформативность железобетонных сооружений при кратковременном динамическом нагружении. Нортхэмптон; Томск: Изд-во STT, 2002. – 336 с.
7. Experimental analysis and modeling of two-way reinforced concrete slabs over different kinds of yielding supports under short-term dynamic loading / B. Chiaia, O. Kumpyak, L. Placidi et al. // Engineering Structures. – 2015. – № 96. – P. 88–99.
8. Chen X., Wu S., Zhou J. Experimental and modeling study of dynamic mechanical properties of cement paste, mortar and concrete // Construction and Building Materials. – 2013. – V. 47. – P. 419–430.
9. Asprone D., Cadoni E., Prota A. Experimental analysis of tensile dynamic behavior of existing concrete under high strain rates // ACI Structural Journal. – 2009. – V. 106. – № 1. – P. 106–113.
10. Yan D., Lin G. Dynamic properties of concrete in direct tension // Cement and concrete research. – 2006. – № 36. – P. 1371–1378.
11. Short and long term cracking behavior of GFRP reinforced concrete beams / C. Mias, L. Torres, M. Guadagnini, A. Turon // Composites Part B: Engineering. – 2015. – V. 77. – P. 223–231.
12. Lou T., Lopes S.M.R., Lopes A.V. FE analysis of short- and long-term behavior of simply supported slender prestressed concrete columns under eccentric end axial loads causing uniaxial bending // Engineering Structures. – 2015. – V. 85. – P. 52–62.
13. Установка для экспериментальных исследований строительных конструкций: пат. Рос. Федерация № 66534; заявл. 19.03.2007; опубл. 10.09.2007, Бюл. № 25. – 2 с.
14. Тензометрическое устройство для измерения деформаций бетона железобетонных конструкций: пат. Рос. Федерация № 76118; заявл. 07.04.2008; опубл. 10.09.2008, Бюл. № 25. – 2 с.
15. Тензометрическое устройство для измерения деформаций арматуры железобетонных конструкций: пат. Рос. Федерация № 76117; заявл. 07.04.2008; опубл. 10.09.2008, Бюл. № 25. – 2 с.
16. Стенд для испытания железобетонных элементов на однократное кратковременное динамическое воздействие: пат. Рос. Федерация № 76133; заявл. 07.04.2008; опубл. 10.09.2008, Бюл. № 25. – 2 с.
17. Экспериментальные и численные исследования прочности стыков железобетонных колонн при кратковременном динамическом нагружении / В.С. Плевков, А.В. Радченко, М.Е. Гончаров, П.А. Радченко // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2014. – № 3. – С. 37–41.
18. Гончаров М.Е. Исследование прочности железобетонных колонн и их стыков с учетом пространственной работы зданий // Сборник научных трудов XII Международной конференции студентов и молодых ученых. – Томск, 2015. – С. 1269–1271.
19. Плевков В.С., Гончаров М.Е. Особенности работы стыков сборных железобетонных колонн при кратковременном динамическом нагружении // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 3. – С. 62–67.
20. Гениев Г.А. О влиянии продолжительности действия нагрузки на прочность материала // Бетон и железобетон. – 1996. – № 4. – С. 19–22.
21. Попов Н.Н., Кумпяк О.Г., Плевков В.С. Вопросы динамического расчета железобетонных конструкций. – Томск, Изд-во Том. Ун-та, 1990. – 288 с.
22. Плевков В.С. Динамическая прочность бетона и арматуры железобетонных конструкций. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 1996. – 64 с.

Поступила 14.03.2017 г.

Информация об авторах

Однокопылов Г.И., кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и электрооборудования Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Саркисов Д.Ю., кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций Томского государственного архитектурно-строительного университета.

UDC 69.058.8

EVALUATION OF BREAKING LOAD PARAMETERS UNDER SHOCK WAVE LOADING FOR CRITICAL CONSTRUCTIONS OF OIL AND GAS SECTOR FACILITIES

Georgy I. Odnokopylov¹,

OGlz@yandex.ru

Dmitriy Yu. Sarkisov²,

Milandd@yandex.ru

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

² Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Square, Tomsk, 634003, Russia.

Relevance of the research is caused by the fact that in recent years the necessity to design concrete constructions in oil and gas facilities occurs more often. These constructions may be impacted by intensive short-term dynamic loads, emergency bearing of shock-wave character. Risk of shock waves effect on buildings and constructions increases as a result of possible explosions, accidental drop of heavy loads, acts of terrorism, natural and manmade disasters, etc. The occurring specific loads often cause significant damage of building structures, and even their total or partial destruction, which can lead to injury or loss of life, as well as damage of expensive equipment and, therefore, significant material costs. In addition, damage of building structures of critical constructions in oil and gas complex lead to a process shutdown, which is economically inefficient in some cases and even unacceptable.

The main aim of the study is to develop the methodology for assessing the failure load under shock-wave loading for critical building structures of oil and gas complex facilities.

The methods used in the study: measurement of load and support reactions by tensometry methods, graphic-analytical method of research using Microsoft Excel software, numerical integration by Simpson.

The results. The authors have developed the method for estimating the parameters of the shock-wave nature for critical building structures of oil and gas complex facilities applying the instantaneous and average values of resultant force coefficients. By the example of the short-term dynamic load test of reinforced concrete bent element the authors obtained the instant and average values of resultant force coefficient.

Key words:

Resultant force coefficient, short-term dynamic load, shock-wave loading, reinforced concrete, support reactions, experimental study.

REFERENCES

- Plevkov V.S., Radchenko A.V., Baldin I.V., Radchenko P.A., Goncharov M.E., Batuev S.P. Features of destruction of reinforced concrete structures under dynamic loading. *Vestnik Tambovskogo Universiteta*, 2013, vol. 18–4, pp. 1578–1579. In Rus.
- Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. *Prochnost i deformativnost zhelezobetonnykh konstruksiy na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении* [Strength and deformability of reinforced concrete structures on compliant supports at short-term dynamic loading] Tomsk, Tomsk State university of architecture and building Press, 2016. 272 p.
- Ozbolt J., Sharma A., Irhan B. Tensile behavior of concrete under high loading rates. *Int. J. of Impact Eng.*, 2014, vol. 69, no. 5, pp. 55–68.
- Kim J.H., Kim D., Han Heung Nam. Strain rate dependent tensile behavior of advanced high strength steels. *Materials Science & Engineering A*, 2013, no. 559, pp. 222–231.
- Shang, S., Song Y. Dynamic biaxial tensile-compressive strength and failure criterion of plain concrete. *Construction and Building Materials*, 2013, vol. 40, no. 2, pp. 322–329.
- Kumpyak O.G., Kopanitsa D.G. *Prochnost i deformativnost zhelezobetonnykh sooruzheniy pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении* [Strength and deformability of concrete structures with short-term dynamic loading]. Northhampton; Tomsk, STT Publ. house, 2002. 336 p.
- Chiaia B., Kumpyak O., Placidi L. Experimental analysis and modeling of two-way reinforced concrete slabs over different kinds of yielding supports under short-term dynamic loading. *Engineering Structures*, 2015, no. 96, pp. 88–99.
- Chen X., Wu S., Zhou J. Experimental and modeling study of dynamic mechanical properties of cement paste, mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 2013, vol. 47, pp. 419–430.
- Asprone D., Cadoni E., Prota A. Experimental analysis of tensile dynamic behavior of existing concrete under high strain rates. *ACI Structural Journal*, 2009, vol. 106, no. 1, pp. 106–113.
- Yan D., Lin G. Dynamic properties of concrete in direct tension. *Cement and concrete research*, 2006, no. 36, pp. 1371–1378.
- Mias C., Torres L., Guadagnini M., Turon A. Short and long term cracking behavior of GFRP reinforced concrete beams. *Composites. Part B: Engineering*, 2015, vol. 77, pp. 223–231.
- Lou T., Lopes S.M.R., Lopes A.V. FE analysis of short- and long-term behavior of simply supported slender prestressed concrete columns under eccentric end axial loads causing uniaxial bending. *Engineering Structures*, 2015, vol. 85, pp. 52–62.
- Plevkov V.S., Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu., Tigay O.Yu., Odnokopylova O.A. *Ustanovka dlya eksperimentalnykh isledovaniy stroitelnykh konstruksiy* [Installation for experimental investigations of building constructions]. Patent RF, no. 66534, 2007.
- Plevkov V.S., Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu., Tigay O.Yu., Ismailov G.M. *Tenzometricheskoe ustroystvo dlya izmereniya deformatsiy betona zhelezobetonnykh konstruksiy* [Strain gauge device for measuring deformation of concrete reinforced concrete structures]. Patent RF, no. 76118, 2008.
- Plevkov V.S., Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu., Tigay O.Yu., Ismailov G.M. *Tenzometricheskoe ustroystvo dlya izmereniya deformatsiy armatury zhelezobetonnykh konstruksiy* [Strain gauge device for measuring deformation of reinforcement in reinforced concrete structures]. Patent RF, no. 76117, 2008.

16. Plevkov V.S., Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu., Tigay O.Yu. *Stend dlya ispytaniya zhelezobetonnykh elementov na odnokratnoe kratkovremennoe dinamicheskoe vozdeystvie* [Stand for testing concrete elements for single short-term dynamic effects]. Patent RF, no. 76133, 2008.
17. Plevkov V.S., Radchenko A.V., Goncharov M.E., Radchenko P.A. Eksperimentalnye i chislennye issledovaniya prochnosti stykov zhelezobetonnykh kolon pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении [Experimental and numerical studies of strength of joints of reinforced concrete columns with short-term dynamic loading]. *Earthquake engineering. Constructions safety*, 2014, no. 3, pp. 37–41.
18. Goncharov M.E. Issledovanie prochnosti zhelezobetonnykh kolon i ikh stykov s uchedom prostranstvenoy raboty zdany [Researching strength of concrete columns and their joints considering spatial work of buildings]. *Sbornik nauchnykh trudov XII Mezhdunarodnoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh* [Proc. of the XII International conference of students and young scientists]. Tomsk, 2015. pp. 1269–1271.
19. Plevkov V.S., Goncharov M.E. Features of joints of precast concrete columns with short-term dynamic loading. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvenogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2014, no. 3, pp. 62–67. In Rus.
20. Geniev G.A. O vliyaniy prodlzhitelnosti deystviya nagruzki na prochnost materiala [Effect of duration of load action on material strength]. *Concrete and reinforced concrete*, 1996, no. 4, pp. 19–22.
21. Popov N.N., Kumpyak O.G., Plevkov V.S. *Voprosy dinamicheskogo rascheta zhelezobetonnykh konstruktsiy* [Issues of dynamic analysis of reinforced concrete structures]. Tomsk, Tomsk University Press, 1990. 288 p.
22. Plevkov V.S. *Dinamicheskaya prochnost betona i armatury zhelezobetonnykh konstruktsiy* [Dynamic strength of concrete and rebar reinforced concrete structures]. Tomsk, Tomsk State university of architecture and building Press, 1996. 64 p.

Received: 14 March 2017.

Information about the authors

Georgy I. Odnokopylov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Dmitriy Yu. Sarkisov, Cand. Sc., associate professor, Tomsk State University of Architecture and Building.

УДК: 612.799.1: 546.49: 631.42: 574 (470+571)

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И БИОМОНИТОРИНГОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РТУТИ В КРЫМСКОМ РЕГИОНЕ

Евстафьева Елена Владимировна^{1,2},
e.evstafeva@mail.ru

Барановская Наталья Владимировна³,
nata@tpu.ru

Тымченко Светлана Леонидовна¹,
rybqa@yahoo.com

Богданова Анна Михайловна¹,
annuta2607@yandex.ru

Нараев Геннадий Павлович⁴,
m_eko@rk.gov.ru

Сологуб Наталия Александровна⁴,
m_eko@rk.gov.ru

Наркович Дина Владимировна³,
narkovich@tpu.ru

¹ Медицинская академия им. С.И. Георгиевского
(структурное подразделение ФГАОУ ВО Крымский Федеральный Университет им. В.И. Вернадского),
Россия, 295006, г. Симферополь, бул. Ленина, 5/7.

² ГАУ РК УНЦ «Экопарк»,
Россия, 298432, п. Береговое, ул. Большая Морская, 40.

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

⁴ Министерство экологии и природных ресурсов Республики Крым,
Россия, 295022, г. Симферополь, ул. Кечкеметская, 198.

Актуальность работы обусловлена необходимостью мониторинга содержания ртути в экосистемах и биосубстратах человека, как начального этапа исследований по оценке воздействия на экосистемы и организм человека с целью установления региональных экологических нормативов ее содержания с учетом природной и техногенной специфики региона.

Цель работы: обобщение полученных ранее данных экологического мониторинга и новых данных биологического мониторинга с целью их сопоставления и оценки информативности используемых подходов при проведении медико-экологического мониторинга на территории Республики Крым.

Методы исследования. Содержание ртути в волосах определяли атомно-абсорбционным методом с использованием анализатора ртути с зеемановской коррекцией неселективного поглощения «РА-915М», пиролитической приставки «ПИРО-915+» и пакета программ RA915P в лаборатории ядерно-геохимических методов исследования кафедры геоэкологии и геохимии Томского политехнического университета.

Результаты. Установлена территориальная неоднородность распределения ртути в биосубстратах (волосах) жителей северного, восточного, западного, южного и центрального географических регионов крымского полуострова, которая может быть обусловлена как природными, так и техногенными особенностями региона проживания. При этом наиболее низкое ее содержание ($\text{min}=0,033$ мкг/г, $\text{max}=0,072$ мкг/г) отмечалось в волосах жителей сельскохозяйственных территорий центрального региона, а наиболее высокие значения ($\text{min}=0,178$ мкг/г, $\text{max}=0,312$ мкг/г) имели место у жителей восточного и, в особенности, южного ($\text{min}=0,134$ мкг/г, $\text{max}=0,505$ мкг/г) регионов крымского полуострова. Выявленные значения ртути практически не выходили за пределы принятых нормативных значений. Однако два обстоятельства указывают на недостаточную информационную ценность традиционных гигиенических нормативов. Во-первых, данные экологического мониторинга, проведенного ранее с использованием европейских экосистемных экологических нормативов (критические нагрузки), и результаты оценки их превышений фактической нагрузкой ртутью по данным длительных (не менее года) полевых исследований. Во-вторых, физиологические эффекты, установленные для таких же уровней ртути в отношении центральной нервной и иммунной систем взрослых и детей, проживающих в Крыму, также указывают на необходимость дальнейших исследований.

Ключевые слова:

Ртуть, критические нагрузки, почвы, волосы, Крымский полуостров.

Введение

Антропогенная трансформация биосферы существенным образом изменяет круговорот веществ и элементов, что влечет изменение химического гомеостаза внутренней среды организма человека, как конечного консумента большинства трофических цепей. При этом возможные последствия для здоровья зависят как от уровня содержания в организме человека элементов, так и от степени их токсичности, биологической роли и физиологической значимости. Особенно существенные эффекты наблюдаются со стороны тяжелых металлов, многие из которых находятся в конкурентных отношениях с биофильными и, что особенно важно, эссенциальными элементами. К числу наиболее токсичных тяжелых металлов относится ртуть, и, согласно заключению международных экспертных сообществ [1–3], этот металл отнесен к приоритетным с точки зрения необходимости первоочередного нормирования воздействия как на экосистемы, так и на организм человека. Еще больший интерес к этому металлу обуславливает его высокая подвижность, что облегчает перенос между средами и объектами окружающей среды, а также усугубляет проблему трансграничного переноса. В связи с этим актуальной задачей при изучении возможной роли ртути как опасного антропогенного фактора на различных территориях является ее мониторинг и выявление как локальных источников ртутного загрязнения естественного и искусственного происхождения, так и определение доли его поступления из источников, расположенных на других территориях.

Высокое разнообразие природных и техногенных условий на территории Крымского полуострова обуславливает особую актуальность изучения разнообразных аспектов распределения этого металла в компонентах окружающей среды и его влияния на экосистемы и организм человека. Было показано, что природные источники поступления ртути в биосферу Крымского полуострова в соответствии с требованиями отечественных гигиенических нормативов (уточнение авторов статьи) не представляют угрозы для жизнеобитания, хотя участки влияния некоторых из них рассматриваются как локальные геопатогенные зоны [4]. В то же время, как указывает источник, содержание ртути в техногенных аномалиях на территории Крымского полуострова в непосредственной близости к источнику загрязнения в отдельных случаях значительно превышает фоновые, приближаясь по значениям к природно-аномальным концентрациям ртути [4]. Более того, показано, что в черте г. Симферополь, например, у детей, проживающих и обучающихся в школе поблизости со свалкой, в почвах которой обнаружено превышение ртути, ее содержание в волосах находилось в пределах нижней половины условной нормы, однако при этом установлены определенные эффекты влияния на функциональное состояние центральной нервной и сердечно-сосудистой систем [5]. Аналогичное на-

блюдение имело место на сельскохозяйственных территориях северного Крыма, находящихся поблизости к крупным источникам промышленного загрязнения, в отношении иммунной системы жителей разного возраста. При этом на таких территориях содержание ртути в волосах в пределах условной нормы у детей 7–15 лет оказывалось значимым для функционального состояния иммунной системы, оказывая иммуносупрессивное действие [6].

В связи с этим проблема изучения распространности этого тяжелого металла в окружающей среде на территории Крымского полуострова является актуальной как с точки зрения биогеохимической специфики региона, так и для определения общих закономерностей влияния этого элемента на компоненты биосферы и, в особенности, на организм человека. С этой целью в Крымском регионе ведутся комплексные исследования, направленные на изучение различных аспектов присутствия ртути в компонентах окружающей среды и ее влияния на здоровье человека. Среди разнообразных подходов к изучению данной проблемы особого внимания заслуживают биомониторинговые исследования содержания ртути в биосубстратах человека, которые являются интегральным индикатором состояния окружающей среды [7–10]. С другой стороны, это не исключает необходимость оценки собственно экологической ситуации в среде обитания человека, в данном случае на предмет присутствия в ней ртути и степени техногенного загрязнения компонентов биосферы этим элементом.

На этот счет существующие традиционные подходы посредством сравнения с отечественными гигиеническими нормативами с позиций современного знания имеют весьма ограниченную информационную ценность [11]. Более прогрессивным и актуальным на сегодняшний день является использование экологических нормативов – критических нагрузок (КН), учитывающих природную устойчивость экосистем и циркулирующую в них загрязнителя. Методика расчета КН разработана и предложена к внедрению в практику экологического нормирования экспертами европейской конвенции о трансграничных переносах атмосферных загрязнителей на дальние расстояния [1] и применялась на некоторых территориях Российской Федерации [12, 13]. Ранее нами были опубликованы результаты расчета КН свинца, кадмия и ртути и определения их превышений при полевых исследованиях в разных регионах Крымского полуострова [14].

Настоящая статья обобщает полученные ранее данные экологического мониторинга и новые данные биологического мониторинга с целью их сопоставления и оценки информативности используемых подходов при проведении медико-экологического мониторинга на территории Республики Крым.

Материалы и методики исследования

Комплексные медико-экологические мониторинговые исследования в Республике Крым в течение последнего десятилетия ведутся в трех направ-

влениях: оценка экологической ситуации, оценка здоровья населения на конкретных территориях и интеграция медико-экологических данных с целью оценки антропогенного воздействия на здоровье [15]. Для оценки экологической ситуации в отношении ртути использовали европейские методики по расчету критических нагрузок тяжелых металлов и их превышений. Для расчета критических нагрузок ртути нами был выбран т. н. основанный на эффекте подход (effect-based approach), учитывающий возможное негативное воздействие тяжелого металла на биоту при его определенных (критических) концентрациях в средах (почва, почвенных растворах, воде, растительной продукции и т. п.). Он базируется на равновесном (сбалансированном) соотношении всех существенных входящих в экосистему и исходящих из нее потоков металла. Картирование нагрузок осуществляли для ячеек сетки 5×5 км, которые применяются в международной программе ЕМЕП. Так как основная картографическая продукция для Крыма находится в системе координат WGS84 зона 36N, геоинформационные слои с сеткой 5×5 км также были переведены в данную систему координат, и в дальнейшем все расчеты площадей проводили в ней. Данные сетки были созданы в форматах геоинформационной системы ArcView 3.2. В результате полевых мониторинговых исследований в нескольких регионах Крымского полуострова определяли фактическую нагрузку на экосистемы (лесные и сельскохозяйственные), а по ее сопоставлению с КН оценивали степень превышения над допустимыми для данной территории нагрузками. Подробное описание методики приведено в [14].

Для характеристики уровней содержания ртути в организме человека были выполнены биомониторинговые исследования, которые заключались в анкетировании и обследовании на предмет содержания ртути в волосах практически здоровых лиц: 14 юношей и 16 девушек (средний возраст $17 \pm 0,5$ лет), проживающих с рождения в 9 административных районах Республики Крым, которые условно представляли южный, северный, восточный, западный и центральный регионы полуострова. Пробы волос получали путем состригания с прикорневой части (2–3 мм) с 3–5 мест на затылочной области головы, ближе к шее, в количестве не менее 5 г [16]. Содержание ртути в волосах определяли атомно-абсорбционным методом с использованием анализатора ртути с зеemanовской коррекцией неселективного поглощения «РА-915М», пиролитической приставки «ПИРО-915+» и пакета программ RA915P в лаборатории ядерно-геохимических методов исследования кафедры геоэкологии и геохимии Томского политехнического университета. В качестве стандарта использовали ГСО ЛБ-1 «Листья березы», содержание ртути 37 нг/г.

Анализ полученных результатов проводили с использованием «Microsoft Office Excel 2007», Statistica 6.0 (StatSoft, USA). Обработку получен-

ных результатов проводили непараметрическими методами, так как распределение данных, проверенных с помощью критериев Шапиро–Уилка, Колмогорова–Смирнова и Лиллифорса, отличалось от нормального. Для описания полученных данных использовали значения медианы (Me), 25 и 75 перцентили (p_{25} , p_{75}), а также минимальные (min) и максимальные (max) значения концентраций. Поскольку объем выборки является недостаточным для количественного сравнения, было проведено качественное сравнение статистических параметров, характеризующих содержание ртути в волосах жителей исследуемых регионов.

Результаты исследования и обсуждение

В выполненных ранее исследованиях [14] расчет критических нагрузок ртути для лесных и сельскохозяйственных экосистем крымского полуострова (рис. 1, 2) показал, что их значения могут быть допустимы в пределах от 0,04 до 6,04 г/га/год в зависимости от типа экосистемы и площади, занимаемой ею в квадрате сетки территории, а анализ результатов полевых исследований фактической нагрузки показал превышение КН ртути только на северных сельскохозяйственных, но подвергающихся загрязнению расположенными поблизости крупными промышленными предприятиями, территориях. Так, фактическая нагрузка ртутью на территории с. Перекоп превысила допустимую для этой территории КН (max 0,53 кг/га/год) на 58,8 %. Интересно отметить, что в проведенных ранее исследованиях [6] содержание ртути в почве на территории этого села колебалось от 0,03 до 0,50 мг/кг, что существенно ниже традиционных гигиенических нормативов – ПДК (2,1 мг/кг).



Рис. 1. Критические нагрузки ртути (кг/га/год) для лесных и сельскохозяйственных экосистем крымского полуострова

Fig. 1. Critical loads of mercury (kg/ha/year) for forest and rural ecosystems of the Crimean Peninsula

Разумеется, различия в качественной оценке экологической ситуации посредством сравнения с традиционными гигиеническими нормативами и современными экологическими нормативами в виде КН могут быть обусловлены тем, что они проводились в разные годы. Однако выявленное в то же

время иммуносупрессивное действие ртути у жителей этого села при ее содержании как в почвах, так и волосах жителей в пределах ПДК [6] дает основание для заключения о недостаточной объективности информации, полученной путем сравнения разовых измерений с гигиеническими нормативами содержания этого металла в различных средах.

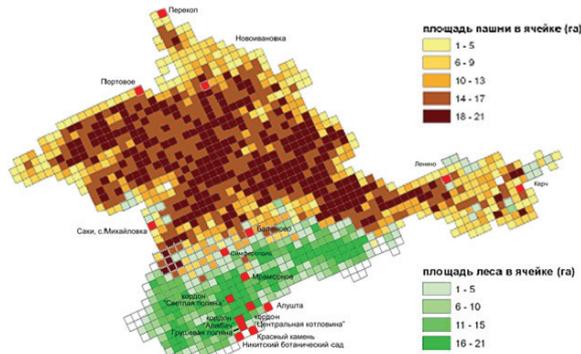


Рис. 2. Расположение мониторинговых площадок на территории крымского полуострова для оценки фактической нагрузки ртутью и ее превышений

Fig. 2. Location of monitoring sites on the territory of the Crimean Peninsula for the current deposition level of mercury and its exceedance assessment

Представляло интерес сравнить данные экологического мониторинга с результатами биомониторингового исследования на тех же территориях. Проведенный в настоящем исследовании анализ содержания ртути в волосах жителей из разных регионов Крыма (рис. 3, 4) показал, что для всей группы тестируемых медиана содержания ртути в волосах составляла 0,083 мкг/г ($p_{25}=0,048$ мкг/г, $p_{75}=0,149$ мкг/г, $\min=0,017$ мкг/г, $\max=0,505$ мкг/г) при условной норме 0,5–1 мкг/г [17].

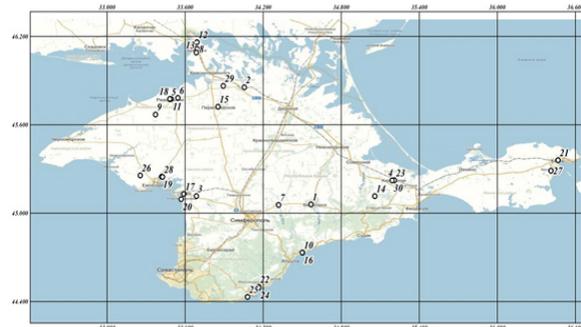


Рис. 3. Локусы проведения биомониторинговых исследований по определению содержания ртути в волосах жителей крымского полуострова

Fig. 3. Biomonitoring research sites used to determine mercury content in human hair in the Crimean Peninsula

Качественное сравнение концентраций ртути в волосах жителей разных регионов Крыма показало, что наиболее низкое ее содержание ($\min=0,033$ мкг/г, $\max=0,072$ мкг/г) отмечалось в волосах жителей сельскохозяйственных территорий центрального региона (Белогорский район), несколь-

ко выше ($\min=0,020$ мкг/г, $\max=0,198$ мкг/г) – в западном (Сакский район), еще выше ($\min=0,017$ мкг/г, $\max=0,284$ мкг/г) – в северном регионе (Красноперекоевский и Раздольненский районы), а наиболее высокие значения ($\min=0,178$ мкг/г, $\max=0,312$ мкг/г) имели место у жителей восточного (г. Керчь) и, в особенности, южного ($\min=0,134$ мкг/г, $\max=0,505$ мкг/г) регионов (Алуштинский и Ялтинский районы) Крымского полуострова. На первый взгляд имеется противоречие между данными экологического и биологического мониторинга ртути на территории северного Крыма, однако прямое сопоставление этих данных именно по с. Перекоп, находящемуся в 3 км от крупного завода «Титан», показывает, что здесь концентрация ртути в волосах жителей составляла 0,260 мкг/г, что существенно выше, чем в других точках отбора проб в этом регионе, часть из которых располагалась вблизи заповедных территорий. Безусловно, это свидетельствует о том, что только географическая дифференциация территорий является недостаточной и требуется обязательный учет техногенных факторов. В южном регионе, где не представлены значительные локальные источники ртутного загрязнения, напротив, выявленные величины содержания ртути в волосах были менее вариабельны (рис. 4).

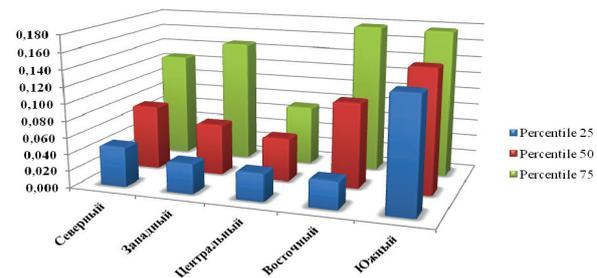


Рис. 4. Содержание ртути в волосах жителей различных регионов крымского полуострова, мкг/г

Fig. 4. Mercury content in human hair in different regions of the Crimean Peninsula, mkg/g

Таким образом, сравнительный анализ содержания ртути в волосах жителей разных регионов Республики Крым показал соответствие принятой в настоящее время условной норме, однако наблюдается территориальная дифференциация ее содержания в таком биосубстрате организма человека как волосы.

Анализ данных русскоязычной литературы [5, 6, 18–28] показывает еще более значимые различия в выявляемых концентрациях ртути в биоматериалах (волосах) человека в разных регионах Российской Федерации и СНГ (рис. 5), которые, по всей видимости, обусловлены как природными и техногенными условиями регионов, так, в том числе, и физиологическими особенностями обследуемых контингентов. Например, выявлены более высокие уровни ртути в волосах легкоатлетов в г. Симферополь, что может быть связано с интенсивным выведением металла вследствие интенс-

фикации обмена веществ при систематических физических нагрузках [18].

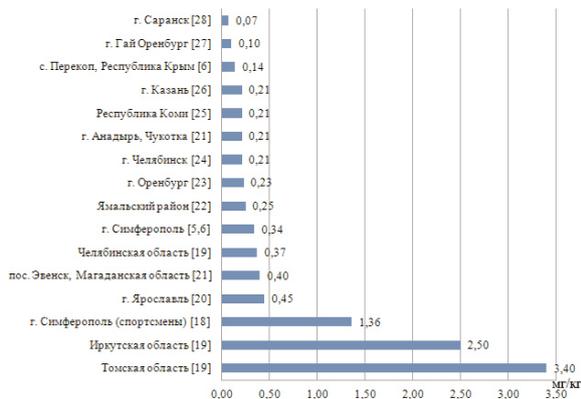


Рис. 5. Содержание ртути в волосах жителей различных регионов Российской Федерации и СНГ, мкг/г

Fig. 5. Mercury content in human hair from different regions of the Russian Federation and CIS, mkg/g

Выявленные в нашем исследовании различия также могут быть предположительно обусловлены природными и техногенными особенностями территорий. Наиболее понятными являются согласующиеся результаты биомониторингового и экологического исследования содержания ртути на территории с. Перекоп, находящегося вблизи крупного промышленного предприятия. Вполне закономерный характер наблюдали также в отношении наиболее высоких и наименее вариабельных концентраций ртути в волосах жителей южнобережных зон (рис. 4). Однако на первый взгляд это не вполне согласуется с нашими результатами экологического мониторинга, которые показали отсутствие превышений критических нагрузок ртути, выпадающей с осадками, на наземные экосистемы данных территорий. Тем не менее, в обоих случаях, по результатам и биологического, и экологического мониторинга, превышений нормативных значений не выявлено, а более высокое содержание ртути в волосах жителей прибрежных территорий в сравнении с жителями других регионов Крымского полуострова, на наш взгляд, может быть обусловлено двумя возможными причинами. Во-первых, это может быть трансграничный атмосферный перенос. В пользу этого свидетельствуют модельные данные по эмиссии и распределению ртути в Европе, в соответствии с которыми нагрузка ртутью в результате трансграничного переноса практически на всей территории Крымского полуострова может составлять от 5 до 50 г/км²/год, что существенно выше рассчитанных нами критических нагрузок. Однако расхождение модельных и наблюдаемых данных только для влажных выпадений может достигать ±45 % [29]. В то же время при малом количестве осадков и более высоком содержании в водяных парах, чем в осадках [30], доля ртути в сухих выпадениях и аэрозолях может быть существенно выше и оказывать прямое воздействие на организм человека непосредственно

через вдыхаемый воздух. С вдыханием аэрозолей морской воды, которая характеризуется в отношении содержания ртути как наиболее неблагоприятная среда [31–33], что характерно, в том числе, для водной экосистемы Черного моря [34], может быть связана вторая причина наблюдаемых нами более высоких концентраций ртути в организме жителей этих территорий. Последнее предположение представляется тем более вероятным, что подобная закономерность наблюдалась ранее на южном берегу Крымского полуострова для радионуклидов, когда их высокие выпадения на южнобережной полосе Крымского полуострова не были связаны с уровнем атмосферных осадков [35].

В сельскохозяйственных районах равнинного Крыма отсутствуют природные источники ртутного загрязнения, но его причиной может быть использование ртуть-содержащих фунгицидов. Для Керченского полуострова основным природным источником поступления ртути в биосферу являются грязевые вулканы, во всех продуктах деятельности которых обнаружены повышенные содержания ртути, а также промышленные предприятия города, в пределах промышленных площадок которых содержание ртути в почвах достигает 28,0 мг/кг [4].

Так или иначе, следующим шагом региональных медико-экологических исследований должен стать поиск причин и источников того или иного уровня загрязнителя в изучаемых компонентах окружающей среды. Необходимость дальнейших региональных исследований подтверждается также и тем обстоятельством, что по мере накопления научных данных пересматриваются нормативы для поллютантов. В частности, ранее безопасным уровнем ртути в волосах считали 30–40 мкг/г [36, 37]. Некоторые авторы считают, что концентрация ртути в волосах не должна превышать 4,4±0,4 мкг/г [38]. В последнее время условной нормой содержания ртути в волосах считают содержание от 0 до 2 мкг/г. Однако, как было указано выше, и при этих низких концентрациях наблюдаются значимые физиологические эффекты. Определение их характера на фоне природных и техногенных особенностей регионов позволит предложить региональные экологические нормативы, наилучшим образом отражающие реальное антропогенное воздействие на организм человека.

Заключение

Изложенные выше данные экологического и биологического мониторинга ртути в экосистемах и биосубстратах жителей разных регионов Крымского полуострова демонстрируют, на наш взгляд, безусловное преимущество экосистемного подхода в виде использования таких экологических нормативов, как критические нагрузки и содержание загрязнителей в биосубстратах человека для комплексной оценки экологической ситуации. Выявленная неоднородность территориального распределения ртути в компонентах экосистем и биосуб-

стратах человека в крымском регионе, а также полученные ранее сведения о физиологической значимости этого элемента при его содержании в более низких концентрациях, чем установленные в настоящем исследовании, свидетельствуют о необходимости дальнейших мониторинговых исследований для установления физиологически обоснованных нормативов допустимого содержания ртути в организме человека с учетом специфики региона проживания. Эта задача представляется тем более важной в современных условиях интенсивного народно-хозяйственного развития полуострова и его геополитической роли, что требует ясного понимания как значимости современной степени техногенной нагрузки, так и главным об-

разом будущих допустимых нагрузок на разнообразные экосистемы Крымского полуострова с учетом их природных буферных свойств и возможностей гомеостатического регулирования при планировании регионального развития территорий.

Работа выполнена в ходе реализации программы академической мобильности на базе ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" в рамках Сети академической мобильности "Развитие научных исследований в области экспериментальной медицины - РНИЭМ", договор № 13-15/5-550 от 20 августа 2015 г. Авторы выражают особую благодарность за оказанную помощь заведующей лабораторией микрэлементного анализа, к.х.н., с.н.с., доценту кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов НИ ТПУ Осиповой Нине Александровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Spranger T., Lorenz U., Gregor H.D. Manual on methodologies and criteria for modeling and mapping critical loads & levels and air pollution effects, risks and trends. – Berlin: Fed. Environ. Agency (Umweltbundesamt), UBA-Texte, 2004. – 307 p.
2. Zhao J., Becker P.R., Meng X.Z. Securing a Strategy to Monitor Emerging Pollutants in the Regional and Global Environment: 2013 International Conference on Environmental Specimen Banks // Environmental Science and Pollution Research International. – 2015. – V. 22. – № 3. – P. 1555–1558.
3. IMOC – Inter organizational Programme for the Sound Management of Chemicals. A cooperative agreement among UNEP, ILO, FAO, WHO, UNIDO, UNITAR and OECD. Global Mercury Assessment. – Geneva: UNEP Chemicals, 2002. – 258 p.
4. Радченко А.И. Распределение ртути в ландшафтно-геохимических зонах Крыма // Минералогический журнал. – 1999. – Т. 21. – № 1. – С. 79–84.
5. Евстафьева И.А. Особенности функционального состояния центральной нервной и сердечнососудистой систем в связи с содержанием тяжелых металлов в организме подростков: дис. ... канд. биол. наук. – Симферополь, 2003. – 130 с.
6. Слюсаренко А.Е. Иммунологическая реактивность организма в различных условиях техногенного загрязнения среды тяжелыми металлами: дис. ... канд. биол. наук. – Симферополь, 2003. – 157 с.
7. Element analysis of biological materials. Current problems and techniques with special reference to trace elements. Appendix II. Technical reports series. – Vienna: IAEA, 1980. – № 197. – P. 351–367.
8. Mercury analysis in hair: Comparability and quality assessment within the transnational COPHES/DEMOCOPHES project / M. Esteban, B.K. Schindler, J.A. Jimenez, H.M. Koch, J. Angerer, M. Rosado, L. Bloemen // Environmental research. – 2015. – № 141. – P. 24–30.
9. Five hundred years of mercury exposure and adaptation / G. Lombardi, A. Lanzirrotti, C. Qualls, F. Socola, A.M. Ali, O. Appenzeller // Journal of biomedicine and biotechnology. – 2011. – № 2012. – P. 472858–472858.
10. Experimental design methodology applied to mercury determination: hair samples as a mercury bioindicator / M. Karimi, F. Aboufazel, H.R.L.Z. Zhad, O. Sadeghi, E. Najafi // Journal of AOAC International. – 2015. – V. 98. – № 1. – P. 176–182.
11. Биогеохимические основы экологического нормирования / В.Н. Башкин, Е.В. Евстафьева, В.В. Снакин, И.О. Алябина. – М.: Наука, 1993. – 312 с.
12. Bashkin V.N. Modern Biogeochemistry: Environmental Risk Assessment, 2nd ed. – New York: Springer Publishers, 2006. – 444 p.
13. Bashkin V.N. Biogeochemical technologies for managing pollution in polar ecosystems // Environmental Pollution. – 2016. – V. 26. – P. 7–18.
14. Подходы к оценке риска от действия тяжелых металлов на наземные экосистемы на территории Республики Крым / Е.В. Евстафьева, Г.П. Нараев, Н.А. Сологуб, С.А. Карпенко // Проблемы анализа риска. – 2015. – Т. 12. – № 5. – С. 6–15.
15. Евстафьева Е.В. Оценка экологического риска для здоровья на территории Республики Крым // Проблемы анализа риска. – 2014. – Т. 11. – № 5. – С. 30–38.
16. Kist A.A., Zhuk L.I. Human hair composition and the problems of global ecology. – Tashkent, USSR: Institute of Nuclear Physics of the Uzbek Academy of Sciences, 1991. – 60 p.
17. Ориентировочные фоновые и допустимые биологические уровни некоторых тяжелых металлов в биосубстратах у населения, не имеющего с ними профессионального контакта. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. Приложение 1. Утверждено МПР РФ 30.11.1992. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_90799/37197b6e9878843ed021523902152b55a3767c1c/ (дата обращения: 19.02.2017).
18. Вегето- и кардиоваскулотропное действие химических элементов при их эндогенном содержании в организме спортсменов / А.М. Богданова, С.Л. Тымченко, И.А. Евстафьева, Ю.А. Бояринцева, Е.В. Перекотий // Биогеохимия техногенеза и современные проблемы геохимической экологии: Труды IX Международной биогеохимической школы. – Барнаул, 2015. – Т. 2. – С. 66–69.
19. Очерки геохимии человека: монография / Н.В. Барановская, Л.П. Рихванов, Т.Н. Игнатова, Д.В. Наркович, О.А. Денисова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 378 с.
20. The influence of physical activity on hair toxic and essential trace element content in male and female students / I.P. Zaitseva, A.A. Skalny, A.A. Tinkov, E.S. Berezkina, A.R. Grabeklis, A.V. Skalny // Biological trace element research. – 2015. – V. 163. – № 1–2. – P. 58–66.
21. Максимов А.Л., Луговая Е.А. Сравнительная оценка элементного статуса девочек-аборигенов различных районов Северо-Востока России // Экология человека. – 2010. – № 7. – С. 30–35.
22. Содержание металлов в волосах детей Ямало-Ненецкого автономного округа / О.М. Журба, В.С. Рукавишников, А.В. Меринов, А.Н. Алексеенко // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 4 (1). – С. 175–177.

23. Нотова С.В. Элементный состав волос пациентов при различных заболеваниях // Вестник ОГУ. – 2005. – № 2 (40). – С. 55–58.
24. Тушиков В.А., Наумова Н.Л., Ребезов М.Б. Элементный состав волос как отражение экологической ситуации // Человек. Спорт. Медицина. – 2012. – № 21 (280). – С. 119–122.
25. Зайнуллин В.Г., Боднарь И.С., Кондратёнок Б.М. Особенности накопления химических элементов в волосах детского населения республики Коми // Известия Коми НЦ УрО РАН. – 2014. – № 2 (18). – С. 24–31.
26. Анализ содержания химических элементов в волосах девочек 16–17 лет, проживающих и обучающихся в районе г. Казани с развитой транспортной сетью / Н.Б. Дикопольская, Э. Салахьева, Н.В. Святова, Ф.Г. Ситдинов // Вестник ТГГПУ. – 2008. – № 15. – С. 67–72.
27. Михайлов А.Н. Биоаккумуляция ртути в биосредах мальчиков и девочек промышленного города // Вестник ОГУ. – 2010. – № 1 (107). – С. 120–121.
28. Янин Е.П. Оценка интенсивности накопления тяжелых металлов в волосах детей в зависимости от места работы родителей // Биогеохимия и биохимия микроэлементов в условиях техногенеза биосферы: Материалы VIII Международной Биогеохимической Школы, посвященной 150-летию со дня рождения академика В.И. Вернадского. – М: ГЕОХИ РАН, 2013. – С. 243–246.
29. Intercomparison study of atmospheric mercury models: 2. Modeling results vs. long-term observations and comparison of country deposition budgets / A. Ryaboshapko, O.R. Bullock, J. Christensen, M. Cohen, A. Dastoor, I. Ilyin, G. Petersen, D. Syrakov, O. Travnikov, R.S. Artz, D. Davignon, R.R. Draxler, J. Munthe, J. Pacyna // Science of the Total Environment. – 2007. – № 377. – P. 319–333.
30. Influence of long-range transboundary transport on atmospheric water vapor mercury collected at the largest city of Tibet / J. Huang, S. Kang, L. Tian, J. Guo, Q. Zhang, Z. Cong, M. Silanpää, S. Sun, L. Tripathee // Science of the Total Environment. – 2016. – V. 566–567. – P. 1215–1222.
31. Integrating Mercury Science and Policy in the Marine Context: Challenges and Opportunities / K.F. Lambert, D.C. Evers, K.A. Warner, S.L. King, N.E. Selin // Environmental Research. – 2012. – № 119. – P. 132–142.
32. Global methylmercury exposure from seafood consumption and risk of developmental neurotoxicity: a systematic review / M.C. Sheehan, T.A. Burke, A. Navas-Acien, P.N. Breyse, J. McGready, M.A. Fox // Bulletin of the World Health Organization. – 2014. – V. 92. – № 4. – P. 254–269.
33. Surveying mercury levels in hair, blood and urine of under 7-year old children from a coastal city in China / G. Chen, X. Chen, C. Yan, X. Wu, G. Zeng // International journal of environmental research and public health. – 2014. – V. 11. – № 11. – P. 12029–12041.
34. Биомониторинг прибрежных вод Черного моря / И.И. Руднева, Н.Ф. Шевченко, И.Н. Залевская, Н.В. Жерко // Водные ресурсы. – 2005. – Т. 32. – № 2. – С. 238–246.
35. Определение содержания стронция-90 в Черном море / В.П. Шведов, А.А. Юзефович, В.А. Ерощев-Шак, С.А. Патин, Л.М. Иванова, А.В. Степанов, А.М. Максимов // Радиоактивная загрязненность морей и океанов. – М.: Наука, 1964. – С. 76–80.
36. Jelliffe E.F. Adverse effects of foods. – New York: Springer Science & Business Media, 2012. – 614 p.
37. International Programme on Chemical Safety (IPCS). Mercury. Environmental Health Criteria. – Geneva: World Health Organization, 1976. – 118 p.
38. Valkonic V. Human hair. Fundamentals and methods for measurement of elemental composition. – Boca Raton: CRC Press, Inc., 1988. – V. 1. – 164 p.

Поступила 01.03.2017 г.

Информация об авторах

Евстафьева Е.В., доктор медицинских наук, доктор биологических наук, профессор, заведующая кафедрой физиологии нормальной Медицинской академии им. С.И. Георгиевского и отдела экологических рисков Медицинской академии им. С.И. Георгиевского (структурное подразделение ФГАОУ ВО Крымский Федеральный Университет им. В.И. Вернадского); заместитель директора ГАУ РК УНЦ «Экопарк».

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

Тымченко С.Л., кандидат медицинских наук, доцент кафедры физиологии нормальной Медицинской академии им. С.И. Георгиевского (структурное подразделение ФГАОУ ВО Крымский Федеральный Университет им. В.И. Вернадского).

Богданова А.М., аспирант кафедры физиологии нормальной Медицинской академии им. С.И. Георгиевского (структурное подразделение ФГАОУ ВО Крымский Федеральный Университет им. В.И. Вернадского).

Нараев Г.П., Министр, Министерство экологии и природных ресурсов Республики Крым.

Сологуб Н.А., Заместитель Министра, Министерство экологии и природных ресурсов Республики Крым.

Наркович Д.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC: 612.799.1: 546.49: 631.42: 574 (470+571)

ENVIRONMENTAL AND BIOMONITORING MERCURY RESEARCH IN THE CRIMEAN REGION

Elena V. Evstafeva^{1,2},
e.evstafeva@mail.ru

Natalia V. Baranovskaya³,
nata@tpu.ru

Svetlana L. Tymchenko¹,
rybqa@yahoo.com

Anna M. Bogdanova¹,
annuta2607@yandex.ru

Gennady P. Naraev⁴,
m_eko@rk.gov.ru

Nataliya A. Sologub⁴,
m_eko@rk.gov.ru

Dina V. Narkovich³,
narkovich@tpu.ru

¹ Medical academy named after S.I. Georgievsky, CFU,
5/7, Lenin Avenue, Simferopol, 295006, Russia.

² Educational and Scientific Centre «Ecopark»,
40, Bolshaya Morskaya Street, Beregovoe, 295006, Russia.

³ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

⁴ Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Crimea,
198, Kechkemetskaya Street, Simferopol, 295022, Russia.

Effective mercury monitoring in ecosystems and humans is needed as a primary step to estimate regional ecological mercury standards based on environmental depositions and due to the technogenic influence.

This aim of the study is to evaluate and summarize all the present data of environmental and biomonitoring alone and in combination to provide the most relevant strategies for medico-ecological monitoring in the Crimea.

The methods used in the study. Mercury content in hair was determined by atomic adsorption analysis using mercury analyzer RA-915+ with PYRO-915 attachment in the laboratory of nuclear-geochemical methods of investigation at the Department of Geoecology and Geochemistry in National Research Tomsk Polytechnic University.

The results. The authors have determined mercury heterogeneous distribution in biosubstrates (hair) of people living in northern, eastern, western, southern and central regions of Crimean Peninsula that might be caused by environmental depositions and due to the technogenic influence with values not exceeding the maximum permissible concentrations. The lowest mercury values (min=0,033 mkg/g, max=0,072 mkg/g) were observed in hair of people living in rural areas of the central region and the highest content (min=0,178 mkg/g, max=0,312 mkg/g) was noted among people living in eastern and especially in southern (min=0,134 mkg/g, max=0,505 mkg/g) regions of the Crimean Peninsula. Although the comparison with the data of environmental field studies based on the European standards (critical loads) estimation and assessment of their exceedances, as well as previously revealed physiological effects at similar levels of Hg, indicate insufficient information provided by traditional hygienic standards alone and emphasize the areas for further research.

Key words:

Mercury, critical loads, soil, hair, Crimean Peninsula.

The research was carried out within the academic mobility program at National Research Tomsk Polytechnic University, «Development of research investigations in the experimental medicine», agreement no. 13–15/5–550, 20 August 2015. The authors appreciate the aid of Nina A. Osipova, Cand. Sc., senior researcher, associate professor, Geoecology and Geochemistry department, head of the laboratory of microelemental analysis, Natural Resource Institute, National Research Tomsk Polytechnic University.

REFERENCES

1. Spranger T., Lorenz U., Gregor H.D. *Manual on methodologies and criteria for modeling and mapping critical loads, levels and air pollution effects, risks and trends*. Berlin, Fed. Environ. Agency (Umweltbundesamt), UBA – Texte, 2004. 307 p.
2. Zhao J., Becker P.R., Meng X.Z. Securing a Strategy to Monitor Emerging Pollutants in the Regional and Global Environment. 2013 International Conference on Environmental Specimen Banks. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 1555–1558.
3. IMOC – Inter organizational Programme for the Sound Management of Chemicals. *A cooperative agreement among UNEP, ILO, FAO, WHO, UNIDO, UNITAR and OECD. Global Mercury Assessment*. Geneva, UNEP Chemicals, 2002. 258 p.
4. Radchenko A.I. Raspredeleniye rtuti v landshaftno-geokhimicheskikh zonakh Kryma [Mercury distribution in landscape-geochemical areas of the Crimea]. *Mineralogicheskij zhurnal*, 1999, vol. 21, no. 1, pp. 79–84.
5. Evstafeva I.A. *Osobennosti funktsionalnogo sostoyaniya tsentralnoy nervnoy i serdechnosudistoy sistem v svyazi s sodержaniyem tyazhelykh metallov v organizme podrostkov*. Dis. Kand. nauk [Features of functional state of the central nervous and cardiovascular systems in relation to the content of heavy metals in the body of teenagers. Cand. Diss.]. Simferopol, 2003. 130 p.
6. Slyusarenko A.E. *Immunologicheskaya reaktivnost organizma v razlichnykh usloviyakh tekhnogennogo zagryazneniya sredy tyazhelymi metallami*. Dis. Kand. nauk [Immunological reactivity of the organism in different conditions of technogenic pollution with heavy metals. Cand. Diss.]. Simferopol, 2003. 157 p.
7. Element analysis of biological materials. *Current problems and techniques with special reference to trace elements*. Appendix II. Technical reports series, 1980, no. 197, pp. 351–367.
8. Esteban M., Schindler B.K., Jimenez, J.A., Koch H.M., Angerer J., Rosado M., Bloemen L. Mercury analysis in hair: Comparability and quality assessment within the transnational COPHES/DEMOCOPHES project. *Environmental research*, 2015, no. 141, pp. 24–30.
9. Lombardi G., Lanzirotti A., Qualls C., Socola F., Ali A.M., Appenzeller O. Five hundred years of mercury exposure and adaptation. *Journal of biomedicine and biotechnology*, 2011, no. 2012, pp. 472858–472858.
10. Karimi M., Aboufazel F., Zhad H.R.L.Z., Sadeghi O., Najafi E. Experimental design methodology applied to mercury determination: hair samples as a mercury bioindicator. *Journal of AOAC International*, 2015, vol. 98, no. 1, pp. 176–182.
11. Bashkin V.N., Evstafeyeva E.V., Snakin V.V. *Biogekhimicheskiye osnovy ekologicheskogo normirovaniya* [Biochemical bases of environmental regulation]. Moscow, Nauka Publ., 1993. 312 p.
12. Bashkin V.N. *Modern Biogeochemistry: Environmental Risk Assessment*, 2nd ed. New York, Springer Publishers, 2006. 444 p.
13. Bashkin V.N. Biogeochemical technologies for managing pollution in polar ecosystems. *Environmental Pollution*, 2016, vol. 26, pp. 7–18.
14. Evstafeva E.V., Naraev G.P., Sologub N.A., Karpenko S.A. Podkhody k otsenke riska ot deystviya tyazhelykh metallov na nazemnye ekosistemy na territorii Respubliki Krym [Approaches to risk assessment of heavy metals effect on terrestrial ecosystems in the Republic of Crimea]. *Problemy analiza riska*, 2015, vol. 12, no. 5, pp. 6–15.
15. Evstafeva E.V. Otsenka ekologicheskogo riska dlya zdorovya na territorii Respubliki Krym [Assessing the environmental risk to health in the Republic of Crimea]. *Problemy analiza riska*, 2014, vol. 11, no. 5, pp. 30–38.
16. Kist A.A., Zhuk L.I. *Human hair composition and the problems of global ecology*. Tashkent, USSR, Institute of Nuclear Physics of the Uzbek Academy of Sciences, 1991. 60 p.
17. Oriyentirovochnye fonovy i dopustimye biologicheskiye urovni nekotorykh tyazhelykh metallov v biosubstratakh u naseleniya, ne imeyushchego s nimi professionalnogo kontakta [Indicative background and permissible biological levels of some heavy metals in biosubstrates of people without occupational exposure to them]. *Kriterii otsenki ekologicheskoy obstanovki territoriy dlya vyyavleniya zon chrezvychaynoy ekologicheskoy situatsii i zon ekologicheskogo bedstviya* [Criteria for assessing the ecological environment areas to identify areas of ecological emergency and ecological disaster zones]. Appendix 1, approved MNR RF 30.11.1992. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_90799/37197b6e9878843ed021523902152b55a3767c1c/ (accessed 19 February 2017).
18. Bogdanova A.M., Tymchenko S.L., Evstafeva I.A., Boyarintseva Yu.A., Perekotiy E.V. Vegeto- i kardiovaskulotropnoe deystvie khimicheskikh elementov pri ikh endogennom sodержanii v organizme sportsmenov [Vegeto and cardio-vasculotropic action of chemical elements in their endogenous content in sportsman body]. *Trudy IX Mezhdunarodnoy biogekhimicheskoy shkoly. Biogekhimiya tekhnogeneza i sovremennyye problemy geokhimicheskoy ekologii* [Proc. of the IX International biogeochemical school. Biogeochemistry of technogenesis and modern problems of geochemical ecology]. Barnaul, 2015. Vol. 2, pp. 66–69.
19. Baranovskaya N.V., Rikhvanov L.P., Ignatova T.N., Narkovich D.V., Denisova O.A. *Ocherki geokhimii cheloveka* [Essays on Human Geochemistry]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2015. 378 p.
20. Zaitseva I.P., Skalny A.A., Tinkov A.A., Berezkina E.S., Grabeklis A.R., Skalny A.V. The influence of physical activity on hair toxic and essential trace element content in male and female students. *Biological trace element research*, 2015, vol. 163, no. 1–2, pp. 58–66.
21. Maksimov A.L., Lugovaya E.A. Comparative evaluation of the element status of Aboriginal girls in different areas of the North-East of Russia. *Ekologiya cheloveka*, 2010, no. 7, pp. 30–35. In Rus.
22. Zhurba O.M., Rukavishnikov V.S., Merinov A.V., Alekseenko A.N. Metal content in hair of children in the Yamalo-Nenets Autonomous Area. *Mezhdunarodny zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*, 2015, vol. 4, no. 1, pp. 175–177. In Rus.
23. Notova S.V. Elementny sostav volos patsientov pri razlichnykh zabollevaniyakh [Elemental composition of hair of patients with different diseases]. *Vestnik OGU*, 2005, vol. 2, no. 40, pp. 55–58.
24. Tupikov V.A., Naumova N.L., Rebezov M.B. Elementny sostav volos kak otrazhenie ekologicheskoy situatsii [Elemental composition of hair as reflection of environmental situation]. *Chelovek. Sport. Meditsina*, 2012, vol. 21, no. 280, pp. 119–122.
25. Zaynullin V.G., Bodnar I.S., Kondratonok B.M. Features of accumulation of chemical elements in hair of child population of the Republic of Komi. *Izvestiya Komi NTS UrO RAN*, 2014, vol. 2, no. 18, pp. 24–31. In Rus.
26. Dikopolskaya N.B., Salakhieva E., Svyatova N.V., Sitdikov F.G. Analysis of content of chemical elements in hair of 16–17 years old girls, living and studying in the area of Kazan city with developed transport network. *Vestnik TGGPU*, 2008, no. 15, pp. 67–72. In Rus.
27. Mikhaylov A.N. Mercury bioaccumulation in biological media of boys and girls in industrial city. *Vestnik OGU*, 2010, vol. 1, no. 107, pp. 120–121. In Rus.
28. Yanin E.P. Otsenka intensivnosti nakopleniya tyazhelykh metallov v volosakh detey v zavisimosti ot mesta raboty roditel'ey [Evaluation of heavy metals accumulation intensity in hair of children, depending on the parents' place of work]. *Biogekhimiya i biokhimiya mikroelementov v usloviyakh tekhnogeneza biosfery. Materialy VIII mezhdunarodnoy Biogekhimicheskoy Shkoly* [Biogeochemistry and biochemistry of trace elements in biosphe-

- re technogenesis. Materials of the VIII International Biogeochemical School], Moscow, GEOKHI RAN Publ., 2013. pp. 243–246.
29. Ryaboshapko A., Bullock O.R., Christensen J., Cohen M., Dastor A., Ilyin I., Petersen G., Syrakov D., Travnikov O., Artz R.S., Davignon D., Draxler R.R., Munthe J., Pacyna J. Intercomparison study of atmospheric mercury models: 2. Modelling results vs. long-term observations and comparison of country deposition budgets. *Science of the Total Environment*, 2007, no. 377, pp. 319–333.
 30. Huang J., Kang S., Tian L., Guo J., Zhang Q., Cong Z., Silanpää M., Sun S., Tripathee L. Influence of long-range transboundary transport on atmospheric water vapor mercury collected at the largest city of Tibet. *Science of the Total Environment*, 2016, no. 566–567, pp. 1215–1222.
 31. Lambert K.F., Evers D.C., Warner K.A., King S.L., Selin N.E. Integrating Mercury Science and Policy in the Marine Context: Challenges and Opportunities. *Environmental Research*, 2012, no. 119, pp. 132–142.
 32. Sheehan M.C., Burke T.A., Navas-Acien A., Breysse P.N., McGready J., Fox M.A. Global methylmercury exposure from seafood consumption and risk of developmental neurotoxicity: a systematic review. *Bulletin of the World Health Organization*, 2014, vol. 92, no. 4, pp. 254–269.
 33. Chen G., Chen X., Yan C., Wu X., Zeng G. Surveying mercury levels in hair, blood and urine of under 7-year old children from a coastal city in China. *International journal of environmental research and public health*, 2014, vol. 11, no. 11, pp. 12029–12041.
 34. Rudneva I.I., Shevchenko N.F., Zalevskaya I.N., Zherko N.V. Biomonitoring pribrezhnykh vod Chernogo moray [Biomonitoring of coastal waters of the Black Sea]. *Vodnyye resursy*, 2005, vol. 32, no. 2, pp. 238–246.
 35. Shvedov V.P., Yuzefovich A.A., Eroshchev-Shak V.A., Patin S.A., Ivanova L.M., Stepanov A.B., Maksimov A.M. Opredelenie sodержaniya strontsiya-90 v Chernom more [Determination of strontium-90 in the Black Sea]. *Radioaktivnaya zagryaznennost morey i okeanov* [Radioactive contamination of seas and oceans], Moscow, Nauka Publ., 1964. pp. 76–80.
 36. Jellife E.F. *Adverse effects of foods*. New York, Springer Science & Business Media, 2012. 614 p.
 37. International Programme on Chemical Safety (IPCS). *Mercury. Environmental Health Criteria*. Geneva, World Health Organization, 1976. 118 p.
 38. Valkonic V. *Human hair. Fundamentals and methods for measurement of elemental composition*. Boca Raton, CRC Press. Inc., 1988. Vol. 1, 164 p.

Received: 1 March 2017.

Information about the authors

Elena V. Evstafeva, Dr. Sc., professor, head of the department, Medical academy named after S.I. Georgievsky, CFU; deputy director, Educational and Scientific Centre «Ecopark».

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

Svetlana L. Tymchenko, Cand. Sc., associate professor, Medical academy named after S.I. Georgievsky, CFU.

Anna M. Bogdanova, postgraduate student, Medical academy named after S.I. Georgievsky, CFU.

Gennady P. Naraev, Minister, Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Crimea.

Nataliya A. Sologub, Deputy Minister, Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Crimea.

Dina V. Narkovich, Cand. Sc., senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 549.322:553.411 (571.53)

МЕТОД КАППАМЕТРИИ КАК ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫЙ КРИТЕРИЙ ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ

Гаврилов Роман Юрьевич¹,
GavrilovRY@tpu.ru

Синкина Екатерина Андреевна¹,
vea1986@mail.ru

Мицых Сергей Николаевич¹,
un7jgz@mail.ru

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

Актуальность проведенного исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности геолого-разведочных работ на рудное золото с использованием комплекса прогнозно-поисковых критериев и признаков.

Цель работы: изучение магнитной восприимчивости пород и руд месторождения Чертово Корято методом каппаметрии и сопоставление полученных результатов с характером распределения золота и его элементов-спутников для разработки петрофизического прогнозно-поискового критерия золотого оруденения.

Методы исследования: изучение петрофизических свойств пород и руд, математическая обработка результатов и интерпретация геохимических и петрофизических данных.

Результаты. Установлено, что для метаморфизованных до эпидот-амфиболитовой фации аркозовых разнозернистых и мелкозернистых песчаников, алевролитов и аргиллитов пород михайловской свиты (PR,mh) значения магнитной восприимчивости изменяются в пределах $0,009...0,359 \times 10^{-3}$ ед. СИ. Показано, что магнитная восприимчивость (χ) в объеме минерализованной зоны месторождения Чертово Корято обусловлена ферромагнитным пирротинном, кристаллизующимся в моноклинной сингонии. Минерализованная зона месторождения уверенно геометризует по данным каппаметрической съемки пород и руд значениями $\chi > 1 \times 10^{-3}$ ед. СИ. Установлено, что существует устойчивая пространственная (Au, As, Co, Ni) и корреляционная (Cu и Ag) связи между распределением элементов и магнитной восприимчивостью пород и руд при том, что высококонтрастные ореолы золота пространственно разобщены с аномальными ореолами магнитной восприимчивости. Вероятно, последнее обусловлено отсутствием золота в кварц-рутил-апатит-пирит-пирротинном минеральном комплексе и разобщенным распределением золота и пирротина в кварц-пирит-арсенопирит-пирротинном с золотом и кварц-полиметаллическом с золотом продуктивных минеральных комплексах. Разработанный петрофизический прогнозно-поисковый критерий золотого оруденения может успешно применяться на площадях, перспективных на аналогичный тип оруденения.

Ключевые слова:

Минерализованная зона, месторождение, магнитная восприимчивость, геохимия, рудные элементы, золото.

Постановка задачи

Одной из важных задач, стоящих перед геологоразведочной отраслью, является выделение перспективных площадей на стадии прогнозно-поисковых работ с целью наращивания минерально-сырьевой базы. В последнее десятилетие в России при проведении геологоразведочных работ применяется высокоточное исследовательское оборудование, позволяющее оперативно получать те или иные характеристики изучаемых объектов (химический состав, физические свойства минералов, пород и руд и др.). Исследования по изучению свойств пирротина и их использование для установления технологических свойств руд, уточнения стадийности минералообразования на месторождениях различных полезных ископаемых активно проводятся с середины прошлого века [1–10 и др.]. Использование современного прецизионного аналитического оборудования существенно сокращает временные и материальные затраты на выделение перспективных участков и позволяет получить дополнительную информацию, направленную на оптимизацию дальнейших геологоразведочных работ. Прибор КТ-10 позволяет проводить измерения магнитной восприимчивости (χ) пород и руд за

считанные секунды. Метод каппаметрии успешно используется при геометризации золотого оруденения [11–13 и др.] и железных руд в Бакчарском рудопоявлении [14, 15], а также других видов полезных ископаемых.

В большинстве случаев промышленное золотое оруденение локализуется в участках земной коры, характеризующихся повышенными значениями магнитного поля [16–21 и др.]. Пирротин является единственным сульфидным минералом-ферромагнетиком, образовавшимся в процессе гидротермально-метасоматического преобразования пород в золоторудных месторождениях [22]. При этом магнитными свойствами обладает только пирротин, кристаллизующийся в моноклинной сингонии, а гексагональный является парамагнетиком [3, 23–25].

При изучении магнитной восприимчивости пород и руд месторождения Чертово Корято [26–28] было установлено, что в распределении пирротина и золота наблюдается отчетливая взаимосвязь: интервалы с промышленным содержанием золота полностью локализируются в пределах ореола пирротинизации, но обособляются от участков с максимальными концентрациями сульфида. Данный вывод был сделан авторами на основании сравнения

распределения значения показателя магнитной восприимчивости с контурами рудных тел по бортовому содержанию ($C_{\text{борт}}$) 1 г/т. В то же время сравнение распределения значений показателя магнитной восприимчивости с распределением рудных элементов, т. е. элементов, входящих в состав руды, в вышеперечисленных работах не проводилось.

В пределах крупнообъемного метасоматического ореола, представленного пятью минеральными комплексами [29], пирротин входит в состав трех минеральных комплексов: кварц-рутил-апатит-пирит-пирротинного, кварц-пирит-арсенопирит-пирротинного с золотом, кварц-полиметаллического с золотом.

Пирротины месторождения Чертово Корыто представлены гексагональной и моноклинной структурными модификациями, различающимися типоморфизмом (химическим составом, доменными структурами, микротвердостью) [25]. В пирротинах трех генераций в сростаниях сосуществуют две модификации в различных соотношениях. Количество моноклинной модификации увеличивается от ранней генерации к поздней. В последнем продуктивном минеральном комплексе количество моноклинного пирротина в три раза превышает его гексагональную разновидность.

Ранее распределение рудных элементов в объеме минерализованной зоны месторождения Чертово Корыто было изучено в двух аспектах. Первый касается изучения химических элементов с позиции поисковой геохимии [30]: построены карты распределения химических элементов на дневной поверхности и разведочных разрезах, создана объемная геолого-геохимическая модель месторождения. Второй подход рассматривает поведение элементов с геолого-генетической позиции [31], позволяющей реконструировать историю химических элементов в процессе геологического развития территории.

Целью работы является изучение магнитной восприимчивости пород и руд месторождения Чертово Корыто методом каппаметрии и сопоставление полученных результатов с характером распределения золота и его элементов-спутников для разработки петрофизического прогнозно-поискового критерия золотого оруденения.

Геологическое строение месторождения

Месторождение располагается на севере Иркутской области в северной части Патомского нагорья (рис. 1). Оно является типичным представителем мезотермального золотого оруденения [29].

Минерализованная зона расположена в синклинальной брахискладке, образованной толщей раннепротерозойских углеродистых пород михайловской свиты (PR₁mh). Углы падения слоев пород варьируют от субгоризонтальных до пологих (10...20°) с изменением направления падения от южного – на северном фланге месторождения – до северо-северо-западного – на южном. Складка осложнена флексурами более высоких порядков. Толща сло-

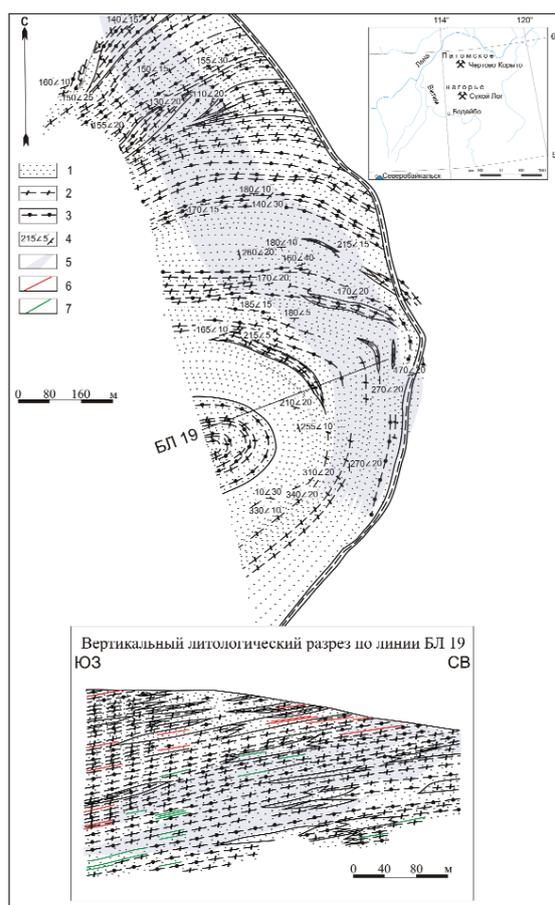


Рис. 1. Схема геологического строения месторождения Чертово Корыто по [31] с дополнениями: 1 – как правило (?), плохо отсортированные серые до темно-серых, от тонко- до среднезернистых, неяснослойчатые грубослойчатые полевошпат-кварцевые песчаники, алевро-песчаники, углеродистые и безуглеродистые; 2 – как правило (?), плохо отсортированные темно-серые разнозернистые, от мелко- до крупнозернистых тонкослойчатые до грубослойчатых полевошпат-кварцевые алевролиты, песчаные алевролиты, углеродистые и безуглеродистые; 3 – аргиллиты серицитовые с незначительным (до 25 об. %) содержанием или отсутствием обломочной фракции песчаной и/или алевритовой размерности, углеродистые и безуглеродистые; 4 – азимут и угол падения слоев; 5 – область сульфидной минерализации; 6 – зоны тонкого расщепления и дробления пород; 7 – тыловые зоны (хлоритовая, альбитовая, березитовая) рудовмещающего метасоматического ореола

Fig. 1. Scheme of geological structure of the Chertovo Koryto deposit [31] with additions: 1 – usually (?), poorly sorted gray to dark gray, thin- to medium-grained, non-clearly-layered coarsely-stratified feldspar-quartz sandstones, silty sandstones, carbon and carbon-free; 2 – usually (?), poorly sorted dark grey various-grained, fine- to coarse-grained thin-layered to coarsely-stratified feldspar-quartz siltstones, sandy siltstones, carbon and carbon-free; 3 – mudstones with minor sericite (up to about 25 vol. %) content or lack of detrital fractions of sand and/or silt dimension, carbon and carbon-free; 4 – azimuth and dip angle of layers; 5 – area of sulphide mineralization; 6 – zones of thin foliation and crushing of rocks; 7 – rear zones (chlorite, albite, gold) of ore-bearing metasomatic halo

жена метаморфизованными до эпидот-амфиболитовой фации аркозовыми разномасштабными, мелкозернистыми песчаниками, алевролитами, аргиллитами. Все породы обогащены восстановленным углеродом от долей до 2 об. %. Пачка терригенно-осадочных пород подверглась метасоматическим изменениям пропилит-березитового типа с образованием многочисленных золото-сульфидно-карбонат-кварцевых жил и прожилков [25, 29, 31, 32].

Рудная залежь оконтурена по бортовому содержанию 0,5 г/т, контролируется глубинным разломом север-северо-западного простирания, падающим в запад-юго-западном направлении под углом около 60°. Локализованная висячем боку разлома залежь полого (до 20°) погружается в западном направлении. Ее протяженность составляет 1,8 км, ширина – до 500 м, мощность достигает 140 м.

Методика исследования

Месторождение изучено поверхностными горными выработками и скважинами колонкового бурения глубиной до 250 м. Запасы золота подсчитаны по категориям C₁ и C₂. По количеству подсчитанного благородного металла месторождение относится к крупным. В зависимости от принятых кондиций морфология рудных тел и их параметры могут изменяться.

Выполнено минералого-геохимическое картирование керна скважин и поверхностных горных выработок с отбором штучных проб на минералогические и геохимические исследования [31].

Измерение магнитной восприимчивости штучных образцов проведено прибором КТ-10. Максимальная чувствительность составляет 1×10^{-6} единиц СИ. Самая большая величина, которая может быть определена, составляет $999,99 \times 10^{-3}$ единиц СИ. Функция автоматического переключения диапазонов измерений обеспечивает работу прибора в диапазоне с наибольшей чувствительностью.

Изучена магнитная восприимчивость (χ) образцов горных пород и руд, отобранных из 10 скважин буровой линии (БЛ) 19. Образцы были представлены штучными половинками керновых проб, полученных путем распила керна диаметром 76 мм вдоль его оси на две равные части. Замеры проводились со стороны ровной поверхности (распила). Магнитная восприимчивость каждого образца измерялась не менее 3-х раз. Конечное значение χ по каждому образцу рассчитывалось как среднее арифметическое. Всего изучено 756 образцов, проведено 2314 измерений.

Эмиссионным спектральным полуколичественным методом в лаборатории Бодайбинской экспедиции по дубликатам штучных образцов проведен анализ содержания 28 элементов. Во всех пробах определены: Ва, Ве, Zr, Mn, Ti, V, Cr, Ni, Co, Pb, Cu, Zn, Sn, Mo, Li, Nb, Sr, Ag, As, Y, W, P, B, La, Sb, Bi, Yb, Tl, характеризующиеся содержаниями ниже чувствительности анализа.

Пробы на золото при средней длине керновой пробы 1 м анализировались пробирным методом в лабораториях дочерних предприятий Ленской зо-

лоторудной компании: ООО «Тонода» и ОАО «Первенец», предел обнаружения метода составил 0,1 г/т. Содержание золота и контроль результатов, полученных пробирным анализом, определялось атомно-абсорбционным методом, предел обнаружения – 0,01 г/т.

По результатам измерения показателя магнитной восприимчивости (χ) и геохимическим данным построены схемы распределения значений магнитной восприимчивости пород и руд, содержания золота и элементов-спутников оруденения по БЛ 19, рассчитаны коэффициенты ранговой корреляции между ними.

Результаты исследования и их обсуждение

Руды месторождения Чертова Коряго сложены пятью минеральными комплексами [29], выделенными в ходе детального текстурно-структурного анализа руд с учетом диагностики генераций минералов на основе их химических составов, типоморфных свойств, номенклатуры и содержания примесей в минералах, термодинамических режимов образования ранних и поздних генераций кварцев (рис. 2).

Наличие на месторождении одного ферримангнитного минерала, существенно влияющего на магнитную восприимчивость пород и руд, – пирротина, доказано детальным изучением минерального состава пород и руд месторождения [29, 31] и измерением их магнитной восприимчивости (рис. 2).

Из рис. 3 видно, что по мере уменьшения количества пирротина в штучных пробах уменьшается и магнитная восприимчивость. Таким образом, магнитная восприимчивость в объеме минерализованной зоны связана с ферримангнитным пирротинном.

В пределах крупнообъемного метасоматического ореола пирротин входит в состав трех минеральных комплексов: кварц-рутил-апатит-пирит-пирротинного, кварц-пирит-арсенипирит-пирротинного с золотом, кварц-полиметаллического с золотом.

Установлено, что для метаморфизованных осадочных терригенных пород михайловской свиты (PR,mh) значения магнитной восприимчивости изменяются в пределах $0,009 \dots 0,359 \times 10^{-3}$ ед. СИ. В крупнообъемном метасоматическом ореоле значения показателя магнитной восприимчивости (χ) существенно возрастают до 10×10^{-3} ед. СИ.

В ходе проведенного исследования построены схемы распределения показателя магнитной восприимчивости (χ), золота, серебра, мышьяка, кобальта, никеля по БЛ 19.

Ореол *показателя магнитной восприимчивости* (χ) представляет собой плитообразную фигуру, простирающуюся согласно минерализованной зоне (рис. 4). Значения показателя варьируют от $0,009 \times 10^{-3}$ до 10×10^{-3} ед. СИ. Ореол магнитной восприимчивости практически полностью совпадает с контуром промышленной минерализации. В пределах контура промышленного оруденения, оконтуренного по $C_{\text{борт.}} = 0,5$ г/т, значения показателя χ превышают 1×10^{-3} ед. СИ.

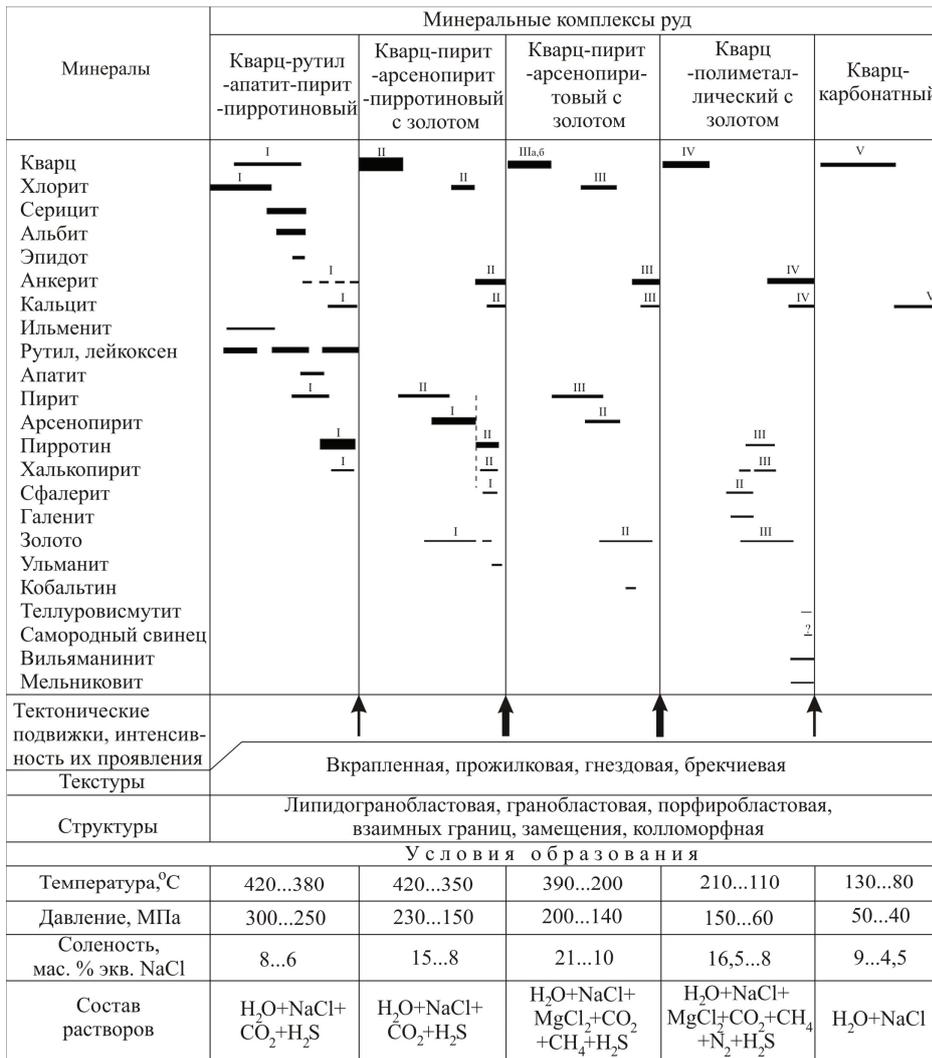


Рис. 2. Схема последовательности минералообразования в месторождении Чертово Корыто по [29] с дополнениями. Примечание. Толщина горизонтальной линии, напротив названия минерала, соотносится с его количеством в комплексе, а ее длина отражает временной интервал выделения минерала в комплексе; вертикальная пунктирная линия соответствует незначительным внутростадийным тектоническим подвижкам; толщина стрелки соответствует интенсивности межстадийных тектонических подвижек

Fig. 2. Sequence of mineral formation in the deposit Chertovo Koryto by [30] with additions. Note. Thickness of horizontal line, opposite the name of mineral, is correlated with its amount in the complex, and its length reflects the temporal interval of mineral selection in the complex; dotted vertical line corresponds to insignificant intra-stage tectonic movements; arrow thickness corresponds to intensity of inter-stage tectonic movements

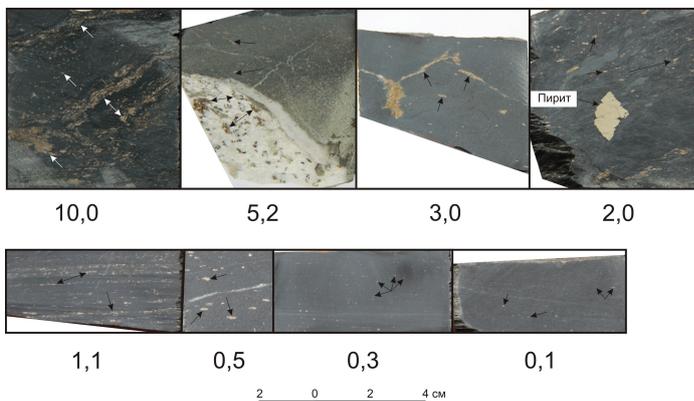


Рис. 3. Зависимость значения показателя магнитной восприимчивости от степени насыщенности образцов пирротиновой минерализацией. Стрелками показаны включения пирротина в штучных образцах пород и руд; под каждым образцом указано значение показателя магнитной восприимчивости в $\text{н} \times 10^{-3}$ ед. СИ

Fig. 3. Dependence of the value of magnetic susceptibility index on degree of saturation of the samples with pyrrhotite mineralization. Arrows indicate the inclusions of pyrrhotite in massive samples of rocks and ores; the value of magnetic susceptibility index is given under each sample in $\text{n} \times 10^{-3}$ SI units

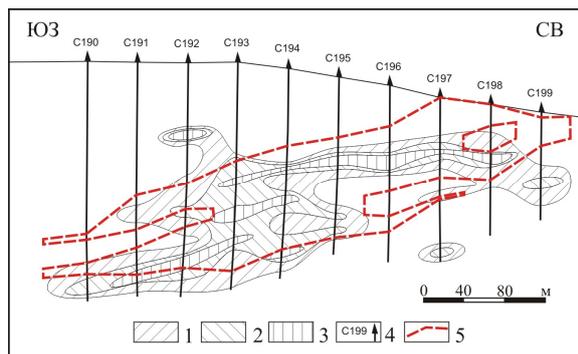


Рис. 4. Распределение показателя магнитной восприимчивости по БЛ 19: 1–3 – значения магнитной восприимчивости, $\times 10^{-3}$ ед. СИ: 1 – 1...1,5; 2 – 1,5...2; 3 – >2; 4 – буровая скважина и ее номер; 5 – контур рудного тела по $C_{\text{сорт.}}=0,5$ г/т

Fig. 4. Distribution of magnetic susceptibility index at DL 19: 1–3 are the values of magnetic susceptibility, $\times 10^{-3}$ SI units.: 1 – 1...1,5; 2 – 1,5...2; 3 – >2; 4 is the borehole and its number; 5 is the contour of the ore body by $S_{\text{cut-off}}=0,5$ ppm

Таким образом, установлено, что минерализованная зона геометризует значениями показателя магнитной восприимчивости, превышающими 1×10^{-3} ед. СИ.

В пределах разреза содержание золота изменяется от значений ниже порога чувствительности анализа до первых граммов на тонну (рис. 5). Ореол промышленных содержаний элемента, оконтуренный по содержанию $\text{Au}=0,5$ г/т, представляет собой уплотненную фигуру, плавно погружающуюся на запад-юго-запад. Внутри контура установлены единичные аномальные ореолы лентообразной формы с концентрацией $\text{Au}>3$ г/т. Ореол золота геометризует значениями показателя χ , превышающими 1×10^{-3} ед. СИ. Высококонтрастные ореолы золота пространственно разобщены с аномально высокими ореолами показателя магнитной восприимчивости пород и руд.

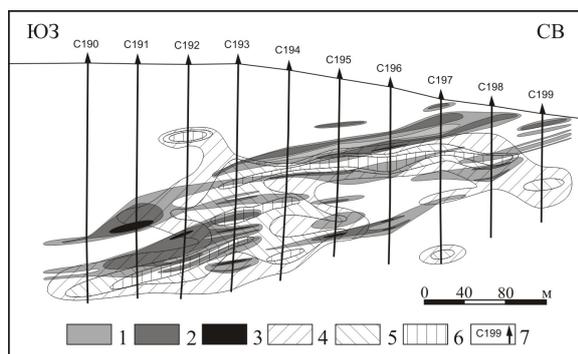


Рис. 5. Распределение золота по БЛ 19: 1–3 – содержание золота, г/т: 1 – 0,5...1; 2 – 1...3; 3 – >3; 4–6 – значения магнитной восприимчивости, $\times 10^{-3}$ ед. СИ: 4 – 1...1,5; 5 – 1,5...2; 6 – >2; 7 – буровая скважина и ее номер

Fig. 5. Distribution of gold at DL 19: 1–3 is the gold content, g/t: 1 – 0,5...1; 2 – 1...3; 3 – >3; 4–6 are the magnetic susceptibility values, $\times 10^{-3}$ SI units.: 4 – 1...1,5; 5 – 1,5...2; 6 – >2; 7 is the borehole and its number

В пределах месторождения преобладают суб-кларковые содержания серебра (рис. 6, а), ореол которого характеризуется гнездовым строением. Большая часть объема, занимаемого ореолами, представлена умеренно контрастными содержаниями $\text{Ag}>0,1$ г/т. Умеренно- и высококонтрастные ореолы представлены телами трубообразной, иглообразной форм. Минераграфическими исследованиями, в том числе с использованием сканирующего электронного микроскопа [29], минералы серебра, включая самородное серебро, в рудном теле не выявлены, однако отмечаются его включения в самородном золоте. Практически не проявлена связь в распределении ореолов серебра с показателем магнитной восприимчивости.

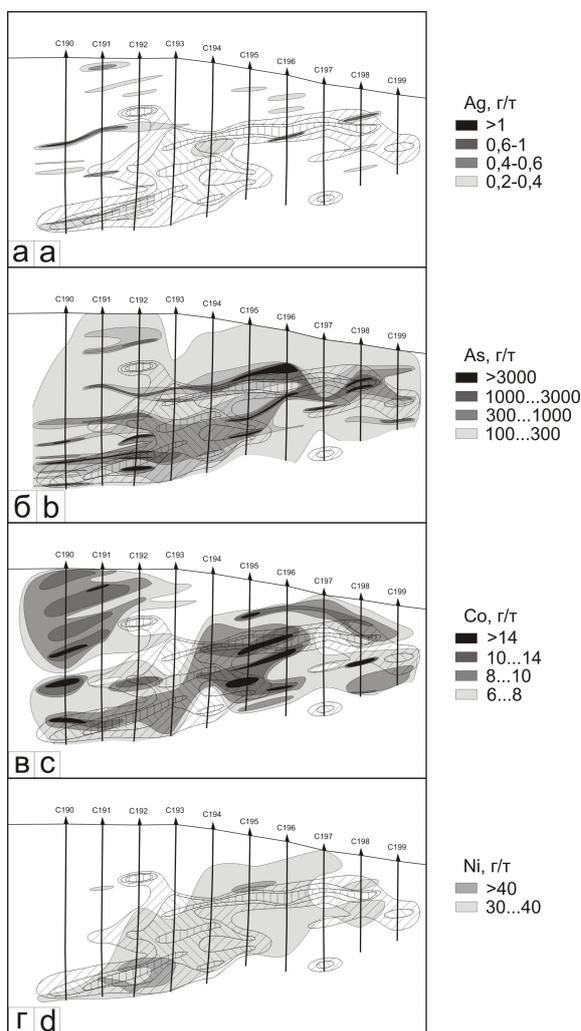


Рис. 6. Схемы распределения рудных элементов по разрезу БЛ 19: а) серебро; б) мышьяк; в) кобальт; г) никель. Условные обозначения см. на рис. 5

Fig. 6. Ore elements distribution along the section DL 19: а) silver; б) arsenic; в) cobalt; д) nickel. Legend, see Fig. 5

Содержания мышьяка в пределах минерализованной зоны существенно превышают фоновый уровень (рис. 6, б). Концентрация элемента в контуре промышленного оруденения превышает зна-

чения 0,1...0,3 %. Наблюдается пространственная взаимосвязь в распределении χ и ореолов мышьяка, а их высококонтрастные аномалии пространственно разобщены. В основном минерале-носителе мышьяка – арсенопирите – отмечаются микропримеси кобальта и никеля, а также механическая примесь золота с включениями серебра.

Ореол концентрации кобальта (рис. 6, в) в целом совпадает с ореолом показателя магнитной восприимчивости (χ), образуя отдельный ореол с содержаниями >6 г/т над рудной залежью (С190–С193). В ряде случаев наблюдается совпадение высококонтрастных ореолов кобальта и золота. Из собственных минералов-носителей кобальта в незначительном количестве на месторождении установлен кобальтин [29].

Содержания никеля в пределах разреза по БЛ 19 представлены значениями 30 г/т и более. Его ореол пространственно совмещен с рудовмещающей толщей и практически полностью совпадает с ореолом χ (рис. 6, г). Повышенные содержания элемента обусловлены, прежде всего, присутствием в рудной зоне пирротина, арсенопирита и пирита.

Концентрации других элементов в породах и рудах месторождения редко превышают фоновые значения и не коррелируют с распределением показателя магнитной восприимчивости.

Ранговым корреляционным анализом установлена значимая положительная взаимосвязь между содержанием золота и показателем магнитной восприимчивости – $r=0,22$ ($n=756$). В то же время, как видно из табл. 1, содержания золота и показателя магнитной восприимчивости (χ) по буровым скважинам характеризуются различными коэффициентами корреляции. При этом значимая корреляционная связь между Au и χ установлена в большинстве скважин.

Таблица 1. Статистические параметры распределения содержания золота и показателя магнитной восприимчивости по скважинам БЛ 19

Table 1. Statistical parameters of gold content distribution and magnetic susceptibility index in wells DL 19

№№ Скважин Drillhole no.	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	
n	96	94	100	93	78	72	69	78	45	31	
r	0,25*	0,52	0,07	0,49	0,14	0,33	0,16	-0,28	-0,12	-0,38	
Au	x_{cp} , г/т mean, ppm	0,21	0,50	0,45	0,62	0,40	1,01	4,96	0,31	0,38	0,25
χ	x_{cp} , $n \times 10^{-3}$ mean, $n \times 10^{-3}$	0,71	0,94	1,19	1,55	1,25	1,07	0,69	0,91	0,97	0,92
Au	V , %	271	201	206	209	243	358	755	162	107	225
χ		141	91	112	116	100	107	176	130	145	102

Примечание. n – количество проб; r – ранговый коэффициент корреляции; x_{cp} – среднее значение; V – коэффициент вариации значений, %; * – жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляционной связи между Au и χ

Note. n is the number of samples; r is the rank correlation coefficient, x_{cp} is the mean value; V is the coefficient of values variation, %; * – the significant coefficients of correlation between Au and χ are in bold

Визуальное сравнение графиков распределения Au и χ по скважинам БЛ 19 свидетельствует о наличии положительной корреляционной связи в их распределении, что не всегда находит отражение при расчете рангового коэффициента корреляции. На рис. 7 показано распределение содержания золота и значения показателя магнитной восприимчивости, характеризующиеся положительной – $r=0,52$ (скв. № 191) и отрицательной – $r=-0,28$ (скв. № 197) значимой корреляцией и отсутствием взаимосвязи – $r=0,14$ (скв. № 194). Отличия в характере взаимоотношения между золотом и показателем магнитной восприимчивости (χ) визуально не обнаруживаются, но устанавливаются методом ранговой корреляции, что в свою очередь обусловлено существенным разбросом значений обоих показателей, достигающим трех порядков.

Вместе с тем неустойчивый характер взаимосвязи между содержанием золота и показателем магнитной восприимчивости (χ) по отдельным скважинам, но значимая положительная корреляционная связь между показателями по БЛ 19 в целом, может также свидетельствовать об их сложной взаимосвязи на различных уровнях оруденения. Кроме того, независимо от характера взаимосвязи между Au и χ в скважинах, часто наблюдается смещение относительно друг друга высоких значений (пики) данных показателей (рис. 5, 7), что, вероятно, обусловлено отсутствием золота в кварц-рутил-апатит-пирит-пирротиновом минеральном комплексе и разобщенным распределением золота и пирротина в кварц-пирит-арсенопирит-пирротиновом с золотом и кварц-полиметаллическом с золотом продуктивных минеральных комплексах. Расхождение в пространственном распределении золотой и пирротиновой минерализации также отмечалось в работах [12, 27].

Для количественной оценки взаимосвязи между элементами-спутниками золотого оруденения месторождения Чертово Кoryто и показателем χ были рассчитаны коэффициенты ранговой корреляции (табл. 2).

Таблица 2. Коэффициенты ранговой корреляции между рудными элементами и показателем магнитной восприимчивости по БЛ 19 ($n=756$)

Table 2. Rank correlation coefficients between ore elements and magnetic susceptibility indices at DL 19 ($n=756$)

	Ni	Co	Pb	Cu	Zn	Ag	As	χ
Ni	1,00	0,14*	-0,01	0,04	0,06	0,02	0,03	0,02
Co	0,14	1,00	-0,00	0,17	0,26	0,04	0,13	0,04
Pb	-0,01	-0,00	1,00	0,16	0,11	0,40	-0,05	-0,01
Cu	0,04	0,17	0,16	1,00	0,26	0,28	-0,06	0,14
Zn	0,06	0,26	0,11	0,26	1,00	0,07	0,05	0,07
Ag	0,02	0,04	0,40	0,28	0,07	1,00	-0,01	0,19
As	0,03	0,13	-0,05	-0,06	0,05	-0,01	1,00	0,01
χ	0,02	0,04	-0,01	0,14	0,07	0,19	0,01	1,00

* – жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляционной связи.

* – significant coefficients of correlation are in bold.

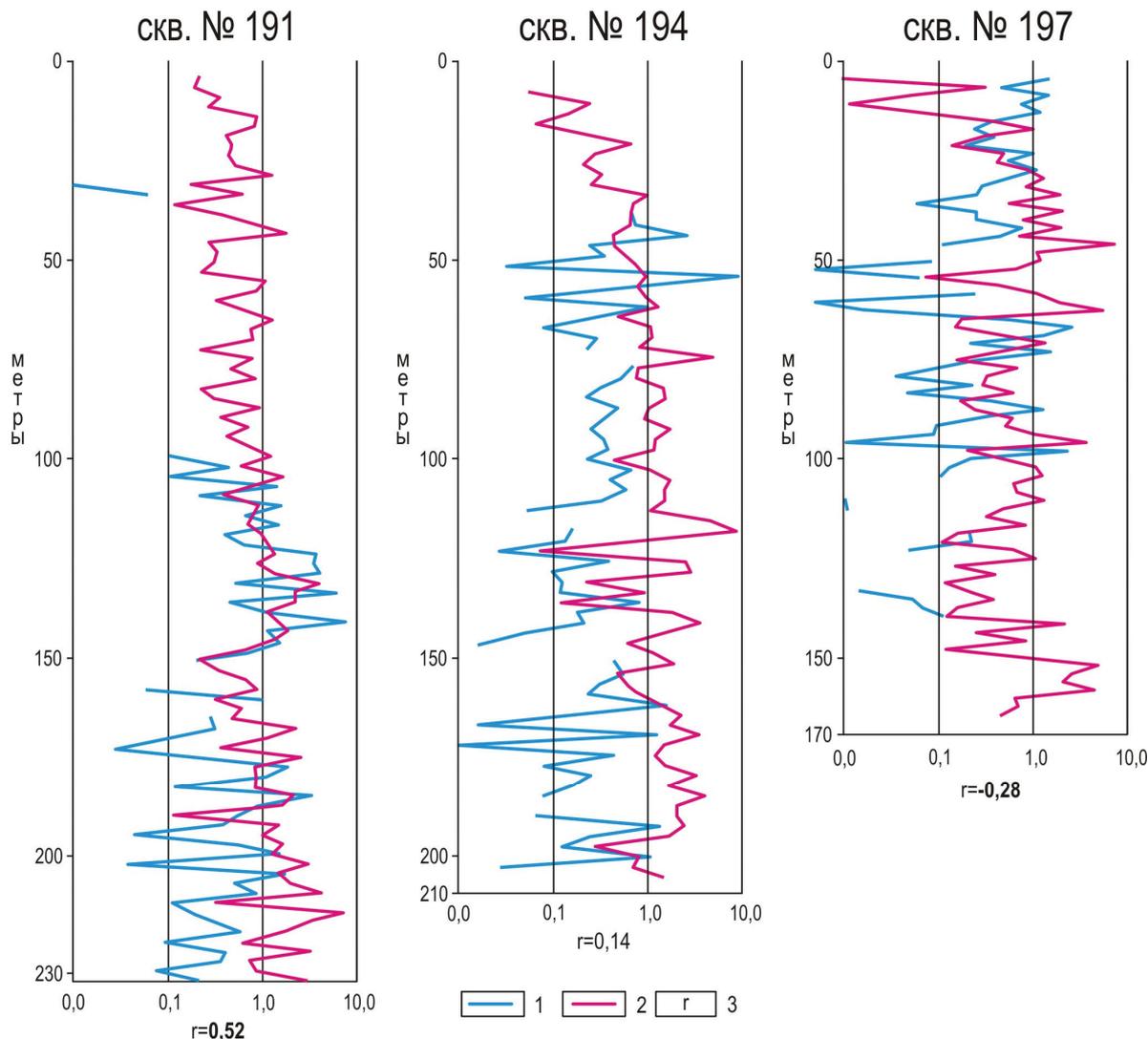


Рис. 7. Распределение содержания золота и значения показателя магнитной восприимчивости по скважинам БЛ 19: 1 – содержание золота, г/т; 2 – значение показателя магнитной восприимчивости (χ), $\mu \times 10^{-3}$; 3 – коэффициент ранговой корреляции между Au и χ

Fig. 7. Distribution of gold content and magnetic susceptibility index in wells DL 19: 1 is the gold content, ppm; 2 is the magnetic susceptibility index (χ), $\mu \times 10^{-3}$; 3 is the rank correlation coefficient between Au and χ

Значимую положительную корреляционную связь с показателем χ проявляют Cu и Ag. Рудные элементы эпизодически проявляют значимую положительную взаимосвязь между собой.

Полученные данные существенно отличаются от результатов сравнения схем распределения χ и рудных элементов по БЛ 19. Очевидно, что различие в наборах элементов, проявляющих пространственную (Au, As, Co, Ni) и статистически устойчивую корреляционную (Cu, Ag) взаимосвязь с показателем χ , обусловлено существенными вариациями сравниваемых значений.

Выводы

На месторождении Чертово Корято пирротин является единственным минералом, обладающим повышенной магнитной восприимчивостью. Таким

образом, аномальные значения показателя магнитной восприимчивости (χ) пород и руд, прежде всего, обусловлены наличием ферромагнитного пирротина, кристаллизующегося в моноклинной сингонии. Распределение значений показателя χ в породах и рудах БЛ 19 варьирует от $0,009 \times 10^{-3}$ до 10×10^{-3} ед. СИ. Минерализованная зона месторождения (оконтуренная по $C_{\text{борг.}} = 0,5$ г/т) уверенно геометризуется по данным каппаметрической съемки значениями $\chi > 1 \times 10^{-3}$ ед. СИ.

Наиболее устойчивую пространственную взаимосвязь с показателем магнитной восприимчивости по разрезу БЛ 19 проявляют Au, As, Co и Ni. Элементы-спутники золотого оруденения образуют как собственные минералы на месторождении (арсенопирит, кобальтин), так и входят в состав большинства сульфидов в виде примеси [29]. По

результатам исследования установлено, что высококонтрастные ореолы золота пространственно разобщены с аномальными ореолами показателя магнитной восприимчивости пород и руд, что, в свою очередь, выражается в неустойчивой корреляционной связи между показателями на различных уровнях оруденения.

Попытка объяснить пространственную разобщенность золота и моноклинного пирротина вытеснением золота из областей «стабильных минералов» в области «нестабильных структур» сделана в [12]. На наш взгляд, это может быть обусловлено отсутствием золота в минеральном комплексе, содержащем пирротиную минерализацию, и разобщенным распределением золота и пирротина в продуктивных минеральных комплексах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рамдор П. Минералы и их сростания. – М.: Изд-во иностр. лит., 1962. – 1132 с.
2. Arnold R.G., Reichen L.E. Measurement of the metal content of naturally occurring metal deficient hexagonal pyrrhotite by an X-ray spacing method // *American Mineralogist*. – 1962. – V. 47. – № 1–2. – P. 105–111.
3. Грабовский М.А., Жерденко О.Н. Доменная структура пирротинов различного генезиса // *Геология рудных месторождений*. – 1964. – № 3. – С. 90–97.
4. Carpenter R.H., Desborough G.A. Range and solid solution and structure of naturally occurring troilite and pyrrhotite // *American Mineralogist*. – 1964. – V. 49. – P. 1350–1364.
5. Desborough G.A., Carpenter R.H. Phase relations of pyrrhotite // *Econ. Geol.* – 1965. – V. 60. – P. 1431–1450.
6. Машуков А.В., Онуфриенок В.В. Физические свойства минералов, индуцированные точечными дефектами. – Красноярск: СФУ, 2007. – 224 с.
7. Direen N.G., Pfeiffer K.M., Schmidt P.W. Strong remanent magnetization in pyrrhotite: a structurally controlled example from the Paleoproterozoic Tanami orogenic gold province, northern Australia // *Precambrian Research*. – 2008. – V. 165. – № 1–2. – P. 96–106.
8. Pyrite and pyrrhotite textures and composition in sediments, laminated quartz veins, and reefs at Bendigo gold mine, Australia: Insights for ore genesis / H.V. Thomas, R.R. Large, S.W. Bull, V. Maslennikov, R.F. Berry, R. Fraser, S. Froud, R. Moye // *Economic Geology*. – 2011. – V. 106. – № 1. – P. 1–31.
9. Paragenesis and composition of ore minerals in the Randalls BIF-hosted gold deposits, Yilgarn Craton, Western Australia: Implications for the timing of deposit formation and constraints on gold sources / J.A. Steadman, R.R. Large, G.J. Davidson, S.W. Bull, J. Thompson, T.R. Ireland, P. Holden // *Precambrian Research*. – 2014. – V. 243. – P. 110–132.
10. Palyanova G., Kokh K., Seryotkin Y. Transformation of pyrite to pyrrhotite in the presence of Au-Ag alloys at 500 °C // *American Mineralogist*. – 2016. – V. 101. – № 12. – P. 2731–2733.
11. Шарафутдинов В.М., Хасанов И.М., Михалицына Т.И. Петрофизическая зональность Наталкинского рудного поля // *Тихоокеанская геология*. – 2008. – Т. 27. – № 5. – С. 89–103.
12. Пирротин золотосодержащих руд: состав, точечные дефекты, магнитные свойства, распределение золота / А.М. Сазонов, В.В. Онуфриенок, Ю.В. Колмаков, Н.А. Некрасова // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. – 2014. – Т. 7. – № 6. – С. 717–737.
13. Mineralogical, chemical and micromorphological studies of the argillic alteration zone of the epithermal gold deposit Ovacik, Western Turkey: tools for applied and genetic economic geology / H.G. Dill, R. Dohrmann, S. Kaufhold, G. Cicek // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2014. – V. 148. – P. 105–127.
14. Бакшт Ф.Б., Пшеничкин А.Я. О возможностях магнитометрии в комплексе ГИС на Бакчарском железорудном месторождении // *Минерально-сырьевая база Сибири: история становления и перспективы: Международных научно-практический форум, посвященный 100-летию первого выпуска горных инженеров в Сибири и 90-летию Сибгеолкома*. – Томск, 10–13 ноября 2008. – Томск: ТПУ, 2008. – Т. 1. – С. 211–214.
15. Рудмин М.А. Фациальные особенности и магнитная восприимчивость рудовмещающих отложений Бакчарского железорудного проявления (Томская область) // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 48–55.
16. Рудерман Е.Н. К созданию системы обнаружения золоторудных метасоматитов геофизическими и геохимическими методами // *Геология и разведка*. – 1990. – № 5. – С. 122–128.
17. Ворошин С.В., Шарафутдинов В.М., Тюкова Е.Э. Аномалии петромагнитных параметров, обусловленные сульфидной минерализацией, и прогноз оруденения в Яно-Колымском золотоносном поясе // *Тихоокеанская геология*. – 2000. – Т. 19. – № 5. – С. 91–104.
18. Абрамов В.Ю., Данилов М.С., Возможности петрофизики почв при поисках полезных ископаемых // *Геофизика*. – 2012. – № 2. – С. 72–79.
19. Пахомов М.И., Пахомов В.И. Петрофизический метод выделения и оценки метасоматитов – М.: Недра, 1988. – 152 с.
20. Ерофеев Л.Я., Орехов А.Н. Геофизические и петрофизические исследования малосульфидных кварцево-жильных месторождений золота Сибири // *Геофизика*. – 2014. – № 3. – С. 55–60.
21. Ерофеев Л.Я., Ерофеева Г.В. Магнитное поле и природа аномалий на сульфидных кварцево-жильных месторождениях золота (на примере Дарасуна, В. Забайкалье) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2015. – Т. 326. – № 6. – С. 16–22.
22. Нагата Т. Магнетизм горных пород. – М.: Мир, 1965. – 346 с.
23. Онуфриенок В.В. Влияние примесных атомов на плотность катионных вакансий (на примере пирротина месторождения Панымба) // *Известия Томского политехнического университета*. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 6–11.
24. Ward J.C. Interaction between cation vacancies in pyrrhotite // *Solid State Communication*. – 1971. – V. 9. – P. 357–361.

25. Peculiarities of pyrrhotite mineralization in the Chertovo Koryto deposit (Patom Uplands) / E.A. Sinkina, O.V. Savinova, O.B. Nepryakhina, Yu.V. Kolbusheva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016 – V. 43. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012011 (дата обращения: 02.02.2017).
26. Колмаков Ю.В., Соколов С.В., Гусев Е.В. Геодинамические условия образования месторождений золота в Патомском нагорье, Восточная Сибирь: фактор их проявления в аномалиях магнитного поля // Отечественная геология. – 2010. – № 4. – С. 8–14.
27. Соколов С.В. Петрофизика золотосульфидного оруденения в углеродистых толщах на примере месторождения Чертово Корято (Патомское нагорье): дис.... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2011. – 86 с.
28. Колмаков Ю.В. Золото-сульфидное месторождение Благодатное (Енисейский край, Россия): природа геофизических аномалий, последовательность и причины образования петрофизической зональности // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 11. – С. 1667–1681.
29. Вагина Е.А. Минеральные комплексы руд и генезис золоторудного месторождения Чертово Корято (Патомское нагорье) // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 63–69.
30. Объемная геолого-геохимическая модель мезотермального золоторудного месторождения Чертово Корято (Патомское нагорье) / Р.Ю. Гаврилов, И.В. Кучеренко, В.Г. Мартыненко, А.В. Верховин // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 1. – С. 30–43.
31. Петролого-геохимические черты рудовмещающего метасоматического ореола золоторудного месторождения Чертово Корято (Патомское нагорье) / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верховин // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 1. – С. 11–20.
32. Sinkina E.A., Savinova O.V., Nepryakhina O.B. Geology, mineralogy and fluid inclusion studies of the Chertovo Koryto deposit, North Transbaikal, Russia. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining: 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2016. – Albena, Bulgaria, 30 June 2016 – 6 July 2016; Code 124231. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012011
33. Chernykh A.I. The permian-triassic gold mineralisation of the northwestern altai-sayany folded region // Surveying Geology and Mining Ecology Management: International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 1. – Albena; Bulgaria; 17–26 June 2014. – P. 341–344.
34. Gold in Pyrite within Altai-Sayan Folded Belt Gold Deposits / A. Pshenichkin, Y. Oskina, O. Savinova, T. Dolgaya // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – Tomsk; Russian Federation; 7–11 April 2014. – V. 21. DOI: 10.1088/1755-1315/21/1/012005
35. Ворошилов В.Г. Аномальные структуры геохимических полей гидротермальных месторождений золота: механизм формирования, методика геометризации, типовые модели, прогноз масштабности оруденения // Геология рудных месторождений. – 2009. – Т. 51. – С. 3–19.
36. Estimating Gold-ore Mineralization Potential Within Topolninsk Ore Field (Gorny Altai) / T. Timkin, V. Voroshilov, O. Askanakova, T. Cherkasova, A. Chernyshov, T. Korotchenko // Earth and Environmental Science: IOP Conference Series. – Tomsk; Russian Federation; 6–10 April 2015. – V. 43. DOI: 10.1088/1755-1315/27/1/012010

Поступила 01.03.2017 г.

Информация об авторах

Гаврилов Р.Ю., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Синкина Е.А., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Мицых С.Н., студент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 549.322:553.411 (571.53)

METHOD OF APPLE TREE AS PROSPECTING CRITERIA OF GOLD MINERALIZATION

Roman Yu. Gavrilov¹,

GavrilovRY@tpu.ru

Ekaterina A. Sinkina¹,

vea1986@mail.ru

Sergey N. Mitsykh¹,

un7jgz@mail.ru

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

The relevance of the research is caused by the necessity to increase the efficiency of gold ore geological exploration works using the complex of forecasting and prospecting criteria and characteristics.

The aim of the research is to study the magnetic susceptibility of rocks and ore deposits of the Chertovo Koryto by the method of magnetic susceptibility measurements and comparison of the obtained results with the character of distribution of gold and its trace elements to develop the petrophysical prospecting criteria of gold mineralization.

Research methods: study of petrophysical properties of rocks and ores, mathematical processing of the results and interpretation of geochemical and petrophysical data.

Results. It was found out that the values of magnetic susceptibility for arkose inequigranular and fine-grained sandstone, siltstone and mudstone rocks of Mikhaylovskaya suite (PR,mh) metamorphosed to the epidote-amphibolite facies varies within $0,009...0,359 \times 10^{-3}$ units SI. It is shown that magnetic susceptibility (χ) in the volume of the mineralized zone of the deposit Chertovo Koryto is caused by the ferrimagnetic pyrrhotite, crystallizing in the monoclinic system. The mineralized zone of the deposit is geometrized by the values of $\chi > 1 \times 10^{-3}$ units SI according to the data of magnetic susceptibility measurements of rocks and ores. It was ascertained that there is a strong spatial (Au, As, Co, Ni) and correlation (Cu and Ag) relation between the elements distribution and magnetic susceptibility of rocks and ores, the high contrast gold halos are spatially separated with abnormal halos of magnetic susceptibility. Probably the latter is caused by the lack of gold in quartz-rutile-apatite-pyrite-pyrrhotite mineral complex and dissociated distribution of pyrrhotite and gold in quartz-pyrite-arsenopyrite-pyrrhotite with gold and quartz-polymetallic and gold producing mineral complexes. The developed petrophysical forecasting and searching criteria of gold mineralization can be successfully applied in the potentially mineralization type areas.

Key words:

Mineralized zone, deposit, magnetic susceptibility, geochemistry, ore elements, gold.

The work was financially supported by the Russian Foundation for basic research (project 16–35–00041\16).

REFERENCES

- Ramdor P. *Mineraly i ikh srastaniya* [Minerals and their fusion]. Moscow, Foreign literature Publ., 1962. 1132 p.
- Arnold R.G., Reichen L.E. Measurement of the metal content of naturally occurring metal deficient hexagonal pyrrhotite by an X-ray spacing method. *American Mineralogist*, 1962, vol. 47, no. 1–2, pp. 105–111.
- Grabovsky M.A., Zherdenko O.N. Domain structure of pyrrhotites of different genesis. *Geology of ore deposits*, 1964, no. 1, pp. 90–97. In Rus.
- Caprenter R.H., Desborough G.A. Range and solid solution and structure of naturally occurring troilite and pyrrhotite. *American Mineralogist*, 1964, vol. 49, pp. 1350–1364.
- Desborough G.A., Carpenter R.H. Phase relations of pyrrhotite. *Econ. Geol.*, 1965, vol. 60, pp. 1431–1450.
- Mashukov A.V., Onufrienok V.V. *Fizicheskie svoystva mineralov, indutsirovannye tochechnymi defektami* [Physical properties of minerals, induced with point defects]. Krasnoyarsk, SFU Press, 2007. 224 p.
- Direen, N.G., Pfeiffer, K.M., Schmidt, P.W. Strong remanent magnetization in pyrrhotite: A structurally controlled example from the Paleoproterozoic Tanami orogenic gold province, northern Australia. *Precambrian Research*, 2008, vol. 165, no. 1–2, pp. 96–106.
- Thomas H.V., Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V., Berry R.F., Fraser R., Froud S., Moye R. Pyrite and pyrrhotite textures and composition in sediments, laminated quartz veins, and reefs at Bendigo gold mine, Australia: Insights for ore genesis. *Economic Geology*, 2011, vol. 106, no. 1, pp. 1–31.
- Steadman J.A., Large R.R., Davidson G.J., Bull S.W., Thompson J., Ireland T.R., Holden P. Paragenesis and composition of ore minerals in the Randalls BIF-hosted gold deposits, Yilgarn Craton, Western Australia: Implications for the timing of deposit formation and constraints on gold sources. *Precambrian Research*, 2014, vol. 243, pp. 110–132.
- Palyanova, G., Kokh, K., Seryotkin, Y. Transformation of pyrite to pyrrhotite in the presence of Au-Ag alloys at 500 °C. *American Mineralogist*, 2016, vol. 101, no. 12, pp. 2731–2737.
- Sharafutdinov V.M., Khasanov I.M., Mikhailitsyna T.I. Petrophysical zoning Natalka ore field. *Pacific Geology*, 2008, vol. 27, no. 5, pp. 89–103. In Rus.
- Sazonov A.M., Onufrienok V.V., Kolmakov Yu.V., Nekrasova N.A. Pyrrhotite in gold-bearing ores: composition, point defects, magnetic properties of gold distribution. *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*, 2014, vol. 7, no. 6, pp. 717–737. In Rus.
- Dill H.G., Dohrmann R., Kaufhold S., Cicek G. Mineralogical, chemical and micromorphological studies of the argillic alteration zone of the epithermal gold deposit Ovacik, Western Turkey: Tools for applied and genetic economic geology. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, vol. 148, pp. 105–127.
- Bakshat F.B., Pshenichkin A.Ya. O vozmozhnostyakh magnitometrii v komplekse GIS na Bakcharskom zhelezorudnom mestom

- rozhdanii [On magnetometry opportunities in GIS complex on Bakcharskoye iron ore deposit]. *Mineralno-syrevaya baza Sibiri: istoriya stanovleniya i perspektivy: Mezhdunarodny nauchno-prakticheskiy forum, posvyashchenny 100-letiyu pervogo vypuska gornykh inzhenerov v Sibiri i 90-letiyu Sibgeolkoma* [Mineral raw material base of Siberia: history and prospects. International scientific practical forum]. Tomsk, 10–13 November 2008. Tomsk, TPU Publ. house, 2008. Vol. 1, pp. 211–214.
15. Rudmin M.A. Facial features and magnetic susceptibility of ore-hosting sediments of Bakchar iron ore occurrence (Tomsk region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 1, pp. 48–55. In Rus.
 16. Ruderman E.N. K sozdaniyu sistemy obnaruzheniya zolotorudnykh metasomatitov geofizicheskimi i geokhimiicheskimi metodami [Development of a system for detecting gold metasomatite by geophysical and geochemical methods]. *Geologiya i razvedka*, 1990, no. 5, pp. 122–125.
 17. Voroshin S.V., Sharafutdinov V.M., Tyukova E.E. Petromagnetic anomalies caused by sulphide mineralization, and mineralization forecast in the Yana-Kolyma gold belt. *Pacific Geology*, 2000, vol. 1, no. 5, pp. 91–104. In Rus.
 18. Abramov V. Yu., Danilov M.S. Features of soil petrophysics in searching for minerals. *Geofizika*, 2012, no. 2, pp. 72–79. In Rus.
 19. Pakhomov M.I., Pakhomov V.I. *Petrofizicheskiy metod vydeleniya i otsenki metasomatitov* [Petrophysical method of allocation and assessment of metasomatites]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 152 p.
 20. Erofeev L.Ya., Orekhov A.N. Geophysical and petrophysical studies of low-sulfide quartz vein gold deposits in Siberia. *Geofizika*, 2014, no. 3, pp. 55–60. In Rus.
 21. Erofeev L.Ya., Erofeeva G.V. Magnetic field and the nature of the anomalies in the quartz-sulphide vein deposits of gold (on the example of Darasun, E. Transbaikal). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 6, pp. 16–22. In Rus.
 22. Nagata T. *Magnetizm gornykh porod* [Rock magnetism]. Moscow, Mir Publ., 1965. 346 p.
 23. Onufrienok V.V. Influence of impurity atoms on density of cationic vacancies (on the example of Panimba pyrrhotite deposit). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 6–11. In Rus.
 24. Ward J.C. Interaction between cation vacancies in pyrrhotite. *Solid State Communication*, 1971, vol. 9, pp. 357–361.
 25. Sinkina E.A., Savinova O.V., Nepryakhina O.B., Kolbysheva Yu.V. Peculiarities of pyrrhotite mineralization in the Chertovo Koryto deposit (Patom Uplands). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012011
 26. Kolmakov Yu.V., Sokolov S.V., Gusev E.V. Geodynamic conditions of formation of gold deposits in Patom Highlands, Eastern Siberia: the factor of their displays anomalies in the magnetic field. *Home geology*, 2010, vol. 4, pp. 8–14. In Rus.
 27. Sokolov S.V. *Petrofizika zolotosulfidnogo orudneniya v uglerodistykh tolshchakh na primere mestorozhdeniya Chertovo Koryto (Patomskoe nagore)*. Dis. Kand. nauk [Petrophysics of gold-mineralization in carbonaceous strata on the example of the Chertovo Koryto deposit (Patom upland). Cand. Diss.]. Tomsk, 2011. 86 p.
 28. Kolmakov Yu.V. The Blagodatnoe gold-sulfide deposit (Eniseyskiy kryazh, Russia): the nature of geophysical anomalies and the succession and causes of formation of petrophysical zoning. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 11, pp. 1321–1332. In Rus.
 29. Vagina E.A. Mineral ore complexes and genesis of gold deposit Chertovo Koryto (Patom upland). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 63–69. In Rus.
 30. Gavrilov R.Yu., Kucherenko I.V., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. Solid geological and geochemical model of mesothermal gold deposit Chertovo Koryto (Patom upland). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 1, pp. 30–43. In Rus.
 31. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. Petro-geochemical characteristics of ore-hosting mesotomatic halo of Chertovo Koryto gold-ore deposit (the Patom upland). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 312, no. 1, pp. 11–20. In Rus.
 32. Sinkina E.A., Savinova O.V., Nepryakhina O.B. Geology, mineralogy and fluid inclusion studies of the Chertovo Koryto deposit, North Transbaikal, Russia. *16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, SGEM 2016*. Albena, Bulgaria, 30 June 2016 – 6 July 2016. Code 124231. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012011
 33. Chernykh A.I. The permian-triassic gold mineralisation of the northwestern Altai-Sayany folded region. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference. Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 1*. Albena; Bulgaria; 17–26 June 2014. pp. 341–344.
 34. Pshenichkin A., Oskina Y., Savinova O., Dolgaya T. Gold in Pyrite within Altai-Sayan Folded Belt Gold Deposits. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Tomsk; Russian Federation; 7–11 April 2014. Vol. 21. DOI: 10.1088/1755-1315/21/1/012005
 35. Voroshilov V.G. Anomalnye struktury geokhimiicheskikh poley gidrotermalnykh mestorozhdeniy zolota: mekhanizm formirovaniya, metodika geometrizatsii, tipovye modeli, prognoz masshtabnosti orudneniya [Anomalous structures of geochemical fields of hydrothermal gold deposits: formation mechanism, methods of geometrization, typical models, and forecasting of ore mineralization]. *Geology of ore deposit*, 2009, vol. 51, no. 1, pp. 3–19.
 36. Timkin T., Voroshilov V., Askanakova O., Cherkasova T., Chernyshov A., Korotchenko T. Estimating Gold-ore Mineralization Potential Within Topolninsk Ore Field (Gorny Altai). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Tomsk; Russian Federation; 6–10 April 2015. Vol. 43. DOI: 10.1088/1755-1315/27/1/012010

Received: 1 March 2017.

Information about the authors

Roman Yu. Gavrilov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Ekaterina A. Sinkina, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey N. Mitsykh, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректурa и перевод на английский язык *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати 27.03.2017. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 13,61. Уч.-изд. л. 12,31.
Заказ 72-17. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ