



**ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ.
СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Том 20 № 1 (2019)

DOI: 10.22363/2312-8143-2019-20-1

<http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Научный журнал

Издается с 2000 г.

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-61174 от 30.03.2015 г.
Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов»

Главный редактор

Разумный Юрий Николаевич — доктор технических наук, профессор, директор Инженерной академии, директор департамента механики и мехатроники Инженерной академии, Российский университет дружбы народов

Заместитель главного редактора

Резник Сергей Васильевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Ракетно-космические композитные конструкции», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Ответственный секретарь

Ткаченко Ирина Михайловна — кандидат технических наук, доцент департамента механики и мехатроники Инженерной академии, Российский университет дружбы народов

Члены редакционной коллегии

Алифанов Олег Михайлович — доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, заведующий кафедрой космических систем и ракетостроения, Московский авиационный институт

Галишикова Вера Владимировна — доктор технических наук, директор департамента строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов

Дивеев Асхат Ибрагимович — доктор технических наук, профессор, заведующий сектором проблем кибернетики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление», Российская академия наук

Захаров Валерий Николаевич — доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, директор Института проблем комплексного освоения недр, Российская академия наук

Калугин Владимир Тимофеевич — доктор технических наук, профессор, руководитель Научно-учебного комплекса специального машиностроения, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Коноплев Владимир Николаевич — доктор технических наук, профессор департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии, Российский университет дружбы народов

Корнилова Анна Владимировна — доктор технических наук, профессор департамента строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов

Мальшев Вениамин Васильевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой системного анализа, Московский авиационный институт

Омельченко Ирина Николаевна — доктор технических наук, доктор экономических наук, профессор, декан факультета инженерного бизнеса и менеджмента, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Попов Гарри Алексеевич — доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, директор Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики, Московский авиационный институт

Рыльникова Марина Владимировна — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем комплексного освоения недр, Российская академия наук

Фомин Валерий Михайлович — доктор технических наук, профессор кафедры автомобильных и тракторных двигателей, Московский государственный машиностроительный университет

Агравал Бридж — профессор Навал Постградуейт Скул, Монтерей, США

Варатараджу Ренугант — профессор Университета Путра Малайзия, Малайзия

Герман Анна — профессор Университета Бейра Интериор, Португалия

Грациани Филиппо — профессор Римского университета «Ла Сапиенца», Италия

Мисра Арун — профессор Университета МакГилл, Канада

Мортари Даниэль — профессор Техасского университета А&М, США

Спенсер Дэвид — профессор Университета Пенн Стейт, США

Фурфаро Роберто — профессор Университета Аризоны, США

Хоуэлл Кэтлин — профессор, Университет Пердью, Уэст-Лафайетт, США

Ясака Тетсуо — профессор эмерит, Университет Кюсю, Япония

ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ. СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

ISSN 2312-8151 (online); ISSN 2312-8143 (print)

Периодичность 4 выпуска в год.

Сайт журнала: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> (открытый доступ)

Языки: русский, английский.

Журнал индексируют: РИНЦ, DOAJ, Ulrich's Periodicals Directory, Cyberleninka, Google Scholar, WorldCat, East View, Dimensions.

Подписной индекс по каталогу агентства «Роспечать» — 18230.

Цель и тематика

В журнале публикуются результаты фундаментальных и прикладных научных исследований российских и зарубежных ученых в области авиационной и ракетно-космической техники, машиностроения и материаловедения, недропользования и нефтегазового дела.

Научный журнал «Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования» адресован научным работникам, инженерам, аспирантам, студентам старших курсов технических вузов.

Выпуски журнала в полнотекстовом виде доступны в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) на платформе Научной электронной библиотеки (НЭБ) elibrary.ru, а также на сайте журнала <http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Редактор *Ю.А. Заикина*

Компьютерная верстка: *О.Г. Горюнова*

Адрес редакции:

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

Тел.: +7 (495) 955-07-16; e-mail: publishing@rudn.ru

Адрес редакционной коллегии серии «Инженерные исследования»:

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

Тел.: +7 (495) 955-07-92; e-mail: engjournalrudn@rudn.university

Подписано в печать 11.03.2019. Выход в свет 25.03.2019. Формат 70×100/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «NewtonС».

Усл. печ. л. 8,71. Тираж 500 экз. Заказ № 1. Цена свободная.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Российский университет дружбы народов» (РУДН)

Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Отпечатано в типографии ИПК РУДН

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

Тел.: +7 (495) 952-04-41; e-mail: publishing@rudn.ru



RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCHES

VOLUME 20 NUMBER 1 (2019)

DOI: 10.22363/2312-8143-2019-20-1

<http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Founded in 2000

Founder: PEOPLES' FRIENDSHIP UNIVERSITY OF RUSSIA

Editor-in-Chief

Yury N. Razumny — Professor, Director of the Academy of Engineering, Director of the Department of Mechanics and Mechatronics of the Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)

Associate Editor-in-Chief

Sergey V. Reznik — Professor, Head of the Department "Rocket and Space Composite Structures", Bauman Moscow State Technical University

Assistant to the Editor-in-Chief

Irina M. Tkachenko — Associate Professor, Department of Mechanics and Mechatronics of the Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)

Editorial Board

Oleg M. Alifanov — Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Space Systems and Missile Design, Moscow Aviation Institute

Vera V. Galishnikova — Associate Professor, Director of the Department of Civil Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)

Askhat I. Diveev — Professor, Head of the Sector of Problems of Cybernetics of Federal Research Center "Informatics and Control", Russian Academy of Sciences

Valery N. Zaharov — Professor, Director of the Institute for Problems of Integrated Development of the Subsurface, Russian Academy of Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences

Vladimir T. Kalugin — Professor, Dean of the Departments of Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University

Vladimir N. Konoplev — Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)

Anna V. Kornilova — Associate Professor, Professor of the Department of Civil Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)

Veniamin V. Malyshev — Professor, Head of the Department of System Analysis, Moscow Aviation Institute

Irina N. Omelchenko — Professor, Dean of the Department of Engineering Business and Management, Bauman Moscow State Technical University

Harri A. Popov — Professor, Director of the Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics, Moscow Aviation Institute, Member of the Russian Academy of Sciences

Marina V. Rylnikova — Professor, Chief Researcher of the Institute for Problems of Integrated Development of the Subsurface, Russian Academy of Sciences

Valeriy M. Fomin — Professor, Moscow Polytechnic University

Brij Agrawal — Professor, Naval Postgraduate School, Monterey, USA

Renuganth Varatharajoo — Professor, University Putra Malaysia, Malaysia

Anna Guerman — Professor, Universidade da Beira Interior, Portugal

Filippo Graziani — Professor, University Roma "La Sapienza", Italy

Kathleen Howell — Professor, Purdue University, USA

Arun Misra — Professor, McGill University, Canada

Daniele Mortari — Professor, Texas A&M University, USA

David Spencer — Professor, Penn State University, USA

Kathleen Howell — Professor of the Purdue University, West Lafayette, USA

Roberto Furfaro — Associate Professor, Professor, University of Arizona, USA

Tetsuo Yasaka — Professor Emeritus, Kyushu University, Japan

RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCHES
Published by the Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow

ISSN 2312-8151 (online); ISSN 2312-8143 (print)

Published 4 times a year.

Journal homepage: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> (Open Access)

Languages: Russian, English.

Indexed by DOAJ, RSCI (elibrary.ru), Ulrich's Periodicals Directory, Cyberleninka, Google Scholar, WorldCat, East View, Dimensions.

Aims and Scope

The journal publishes results of fundamental and applied research of Russian and foreign scientists on specific scientific research themes. The editorial board of the journal invites the cooperation of experts working in the field of aerospace engineering, mechanical engineering and materials science, subsoil use and oil and gas business.

The scientific journal "RUDN Journal of Engineering Researches" is addressed to researchers, engineers, graduate students, senior students of polytechnical universities.

The journal has been included in the list of the leading review journals and editions of the Highest Certification Committee of Ministry of Education and Science of Russian Federation in which the basic results of PhD and Doctoral Theses are to be published.

The journal website operates on the Portal of RUDN University scientific journals: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches>. The website contains full information about the journal, editorial policy and ethics, requirements for the preparation and publication of the articles, etc., as well as full-text issues of the journal since 2008 (Open Access).

Copy Editor *Iu.A. Zaikina*
Layout Designer *O.G. Gorunova*

Address of the editorial board:
3 Ordzhonikidze St., Moscow, 115419, Russian Federation
Ph.: +7 (495) 955-07-16; e-mail: publishing@rudn.ru

Address of the editorial board series "Engineering Researches":
3 Ordzhonikidze St., Moscow, 115419, Russian Federation
Ph.: +7 (495) 955-07-92; e-mail: engjournalrudn@rudn.university

Printing run 500 copies. Open price.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
"Peoples' Friendship University of Russia" (RUDN University)
6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation

Printed at RUDN Publishing House:
3 Ordzhonikidze St., Moscow, 115419, Russian Federation
Ph.: +7 (495) 952-04-41; e-mail: publishing@rudn.ru

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИОННАЯ И КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Нехороших Г.Е. Экспериментальные исследования работоспособности теплозащитного слоя композитных трубопроводов при захлаживании жидким водородом	7
--	---

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Антипов Ю.А., Шкарин К.В., Шаталова И.И., Егоров С.А., Матякубова Н.У. Влияние температур низкопотенциального источника и потребителя теплоты на эффективность теплового насоса	14
--	----

Малькова М.Ю., Задиранов А.Н. Применение универсального ультразвукового реактора для переработки концентратов руд редкоземельных металлов	20
--	----

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Федюк Р.С., Козлов П.Г., Мочалов А.В., Панарин И.И., Тимохин Р.А., Лисейцев Ю.Л. Повышение эффективности городских подземных сооружений в качестве объектов гражданской обороны	28
--	----

Костылева В.В., Щепетова Е.В., Котельников А.Е. Верхнемеловые риолитовые пеплы Деревянных Гор (остров Новая Сибирь, Новосибирские острова)	37
---	----

Синиченко Е.К., Рекач Ф.В., Шамбина С.Л. Актуальное состояние исследований проблем разрушения берегов водных объектов криолитозоны	48
---	----

Абрамов В.Ю., Алджабасини Х. Литологические особенности стратиграфии и тектонического районирования сейсмически активного Загросского краевого прогиба в пределах акватории Персидского залива	57
---	----

Suárez Kozov N., Trujillo Osorio D., Giraldo Osorio J. Application of remote sensing for monitoring of flood areas (Применение дистанционного зондирования для мониторинга зон затопления).....	66
--	----

Дубянский А.И., Алджабасини Х. Способы оценки сейсмичности территории Сирии	79
--	----

Масликова О.Я., Грицук И.И., Ионов Д.Н., Дебольский В.К. Влияние распределения скоростей в закругленном потоке на характер размыва береговых склонов.....	85
--	----

Десяткин А.С., Усова В.М., Котельникова Е.М. Типовые модели разработки комплексных медно-порфириновых месторождений Дальнего Востока России	96
--	----

CONTENTS

AEROSPACE ENGINEERING

- Nekhoroshikh G.E.** Experimental studies of the performance of the heat-shielding layer of composite pipelines during cooling with liquid hydrogen..... 7

MECHANICAL ENGINEERING AND MATERIAL SCIENCE

- Antipov Y.A., Shkarin K.V., Shatalova I.I., Egorov S.A., Matyakubova N.U.** Influence of temperatures of a low-potential source and heat consumer on the efficiency of a heat pump..... 14

- Malkova M.Yu., Zadiranov A.N.** Application of the universal ultrasonic reactor in the processing of rare earth metal ores concentrates 20

EARTH SCIENCE

- Fediuk R.S., Kozlov P.G., Mochalov A.V., Panarin I.I., Timokhin R.A., Liseitsev Yu.L.** Improving the efficiency of urban underground structures as objects of civil defense 28

- Kostyleva V.V., Shchepetova E.V., Kotelnikov A.E.** Upper Cretaceous rhyolitic ashes in the Utes Derevyannykh Gor area (Novaya Sibir Island, the New Siberian Islands)..... 37

- Sinichenko E.K., Rekach F.V., Shambina S.L.** Current state of knowledge on the problem of water objects' frozen watersides destruction 48

- Abramov V.Yu., Aljabasini H.** Lithological features of stratigraphy and tectonic zoning of seismically active Zagros regional trough within the waters of the Persian Gulf..... 57

- Suárez Kozov N., Trujillo Osorio D., Giraldo Osorio J.** Application of remote sensing for monitoring of flood areas..... 66

- Dubyansky A.I., Aljabasini H.** Ways to assess of seismicity of the territory of Syria 79

- Maslikova O.Ya., Gritsuk I.I., Ionov D.N., Debolsky V.K.** Influence of speed distribution in a rounded flow on the character of slopes erosion 85

- Desyatkin A.S., Usova V.M., Kotelnikova E.M.** Standard models for exploration and development complex copper-porphyry deposits in the Far East of the Russian Federation 96



Научная статья

DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-7-13

УДК 678.01

Экспериментальные исследования работоспособности теплозащитного слоя композитных трубопроводов при захлаживании жидким водородом

Г.Е. Нехороших*

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), *Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская улица, д. 5, стр. 1*

История статьи:

Поступила: 12 декабря 2018

Доработана: 19 января 2019

Принята: 30 января 2019

Ключевые слова:

криогенное топливо;
теплоизолирующее покрытие;
жидкий водород;
циклическое захлаживание и отогрев;
технологический процесс;
оснастка

Целью работы является создание нового конструкторско-технологического решения, обеспечивающего работоспособность теплоизолирующих покрытий в условиях многоциклового теплового нагружения. В связи с перспективой применения криогенных топлив в авиационной (многоразовой) технике обеспечение работоспособности теплоизолирующих покрытий в таких условиях является актуальным. Для разработанной технологии проводилось экспериментальное определение основных параметров теплоизолирующих покрытий. В качестве объектов исследований использовались композитные трубопроводы криволинейной и прямолинейной формы. Конструкция трубопровода включала в себя герметизирующую пленочную оболочку, силовую оболочку из полимерного композиционного материала, пенопластовое теплоизолирующее покрытие и металлические присоединительные фланцы. На модельных композитных образцах криогенных трубопроводов проведены циклические испытания на захлаживание жидким водородом (заполнение топливных магистралей) и отогрев до температуры окружающей среды (слив компонентов). В процессе испытаний сначала проводилось охлаждение трубопровода газообразным водородом в течение одного часа. Затем на один час во внутреннюю полость производилась заливка жидкого водорода, после чего в течение часа производился естественный отогрев до нормальной температуры. Полученные результаты позволили определить зависимость температуры и теплового потока оболочки с теплоизолирующих покрытий от количества циклов захлаживания, предложить конструкторско-технологическое решение для существенного уменьшения криоподсоса при больших перепадах температур в теплоизолирующих покрытиях, показать эффективность применения при циклическом захлаживании заливочных пенопластов с закрытой пористостью типа «Викорт-3М».

Введение

Разработка технологии применения для авиационных и ракетных двигателей более эффективных и экологически чистых криогенных топлив в виде

сжиженных газов — водорода (винил), кислорода (оксид), природного газа (метан) — потребовала создания трубопроводных магистралей из современных композиционных материалов, а также новых теплоизолирующих покрытий (ТИП), обеспе-

* Доцент кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции», к.т.н., доцент; nekh0r47ge@mail.ru

© Нехороших Г.Е., 2019



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

чивающих надежную защиту этих магистралей от внешних теплопритоков.

Свойство газов существовать в жидком состоянии при очень низких температурах: водород (23 К), кислород (86 К), воздух (81 К), метан (111 К) требует эффективной тепловой защиты, особенно если магистрали располагаются вне баков, содержащих соответствующий сжиженный газ.

Топливные магистрали двигателей летательных аппаратов многоразового использования нуждаются в надежном ТИП, т.к. при их эксплуатации необходимо многоцикловое захлаживание при заливке криогенного топлива в трубопроводы и отогрев при его сливе. Широко используемые в настоящее время теплоизолирующие покрытия в виде пенополиуретанов (ППУ), наносимых на поверхность защищаемого изделия методом напыления или заливкой смеси из составляющих компонентов, оказались непригодными для криогенных трубопроводов из-за изменения их теплозащитных свойств в процессе циклического захлаживания.

В связи с этим поиск новых конструкторско-технологических решений, обеспечивающих работоспособность ТИП в условиях многоциклового теплового нагружения, является актуальной задачей.

Экспериментальные исследования влияния на работоспособность композитных трубопроводов циклических захлаживаний до температуры жидкого водорода 23 К и последующего отогрева до температуры окружающей среды 293 К были проведены на стендах организации НИИХИММАШ (ФКП «НИЦ РКП»). В качестве объектов исследований использовались композитные трубопроводы внутренним диаметром 50 мм криволинейной и прямолинейной форм, изготовленные в МГТУ имени Н.Э. Баумана, с ТИП, разработанным и нанесенным НПО «Полимерсинтез» [5; 9; 12]. Конструкция трубопровода включала в себя герметизирующую пленочную оболочку, силовую оболочку из полимерного композиционного материала, пенопластовое теплоизолирующее покрытие и металлические присоединительные фланцы. На модельных композитных образцах криогенных трубопроводов проведены циклические испытания на захлаживание жидким водородом (23 К) (заполнение топливных магистралей) и отогрев до температуры окружающей среды (слив компонентов). В процессе испытаний сначала проводилось охлаждение трубопровода газообразным водородом в течение одного часа при температуре от 50 до 80 К. Затем на один час во внутреннюю полость произ-

водилась заливка жидкого водорода с температурой 23 К, после чего в течение часа производился естественный отогрев до температуры 293 К.

1. Обоснование выбора конструкторского решения.

Конструкция криволинейного трубопровода приведена на рис. 1.

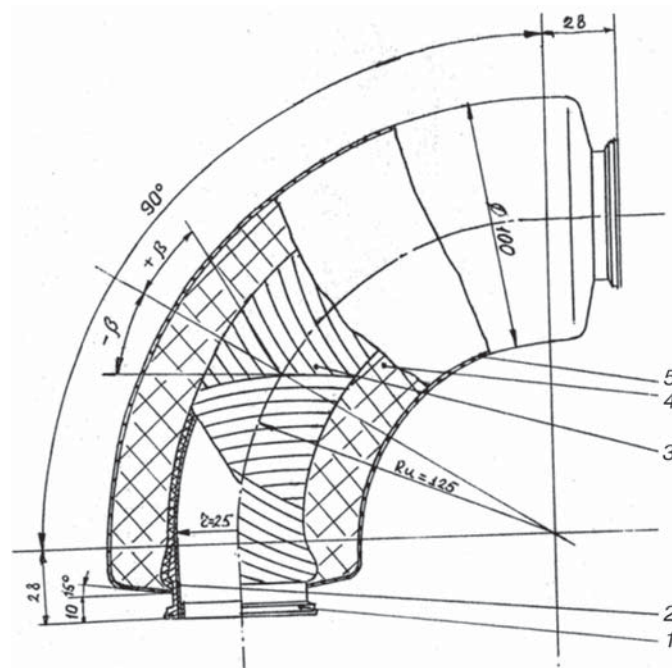


Рис. 1. Криволинейный криогенный композитный трубопровод: 1 — металлическая законцовка; 2 — пленочная герметизирующая несущая оболочка; 3 — намотанная композитная силовая оболочка; 4 — теплозащитное покрытие; 5 — внешний герметизирующий силовой слой

[Figure 1. Curved cryogenic composite pipeline:

1 — metal tip; 2 — film sealing carrier shell; 3 — coiled composite power jacket; 4 — heat protection coating; 5 — external sealing force layer]

Известно, что ППУ покрытия получаются с открытой или закрытой пористостью. Первые испытания модельных трубопроводов с ТИП из напыленного пенополиуретана ППУИ-1, имеющего открытую пористость, выявили способность этого покрытия к быстрому растрескиванию (после 6 циклов) и фактическому разрушению.

Испытатели объясняют это так называемым криоподсосом, наблюдающимся при захлаживании и последующем отогреве. Дело в том, что компоненты воздуха (главным образом азот, кислород, углекислый газ), находящиеся в открытых порах напыленного пенополиуретана типа ППУИ-1, при захлаживании до температуры жидкого водорода 23 К переходят в жидкое и отвержденное состояния,

занимая значительно меньший объем, в который засасываются новые порции воздуха из окружающей среды. При сливе из трубопровода жидкого водорода происходит очень быстрый отогрев до 293 К, приводящий к резкому расширению в порах покрытия находящегося в них газа и, как следствие, повышению давления внутри теплозащитного слоя, растрескиванию и его последующему разрушению.

Наиболее существенно этот недостаток проявляется в пенопластах с открытой пористостью. Немалую роль в растрескивании ТИП играет значительная разница в величине коэффициентов термического расширения материалов герметизирующей, силовой и теплозащитной оболочек криогенного трубопровода.

В связи с этим для покрытия использовался пенопласт с закрытой пористостью, а с целью уменьшения криоподсоса на наружную поверхность теплоизолированного трубопровода приклеивался дополнительный слой герметичной полиэтилен-рефталатной пленки.

По рекомендации специалистов НПО «Полимерсинтез» был выбран пенопласт «Викорт-3М» [12] на основе поликарбодиимида, получаемый методом заливки смеси из составляющих данное покрытие компонентов на изделие, помещенное в пресс-форму, обеспечивающую расчетную толщину наносимого теплоизолирующего покрытия. Песформы для криволинейного и прямолинейного трубопроводов представлены на рис. 2 и 3.

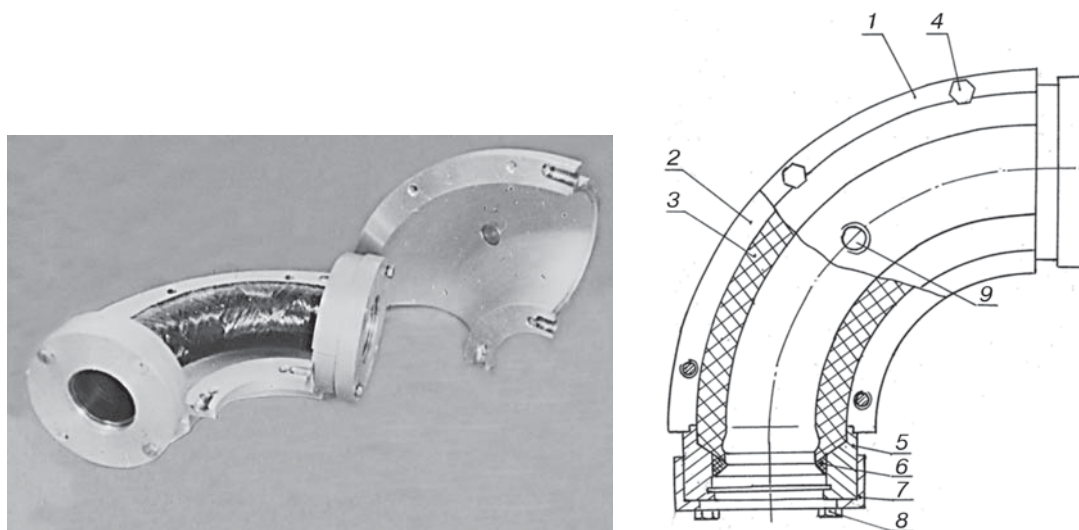


Рис. 2. Пресс-форма для заливки ТИП на криволинейный трубопровод:

1, 2 — верхняя и нижняя полуформы; 3 — залитое покрытие; 4 — стягивающие болты; 5 — торцевые втулки; 6 — уплотнительное кольцо; 7 — торцевые крышки; 8 — болты крепления крышек; 9 — заправочное отверстие

[Figure 2. Mold for casting thermal insulation coating on a curved pipeline:

1, 2 — upper and lower half-forms; 3 — flooded coating; 4 — tightening bolts; 5 — end bushings; 6 — a sealing ring; 7 — end caps; 8 — cover bolts; 9 — filling hole]

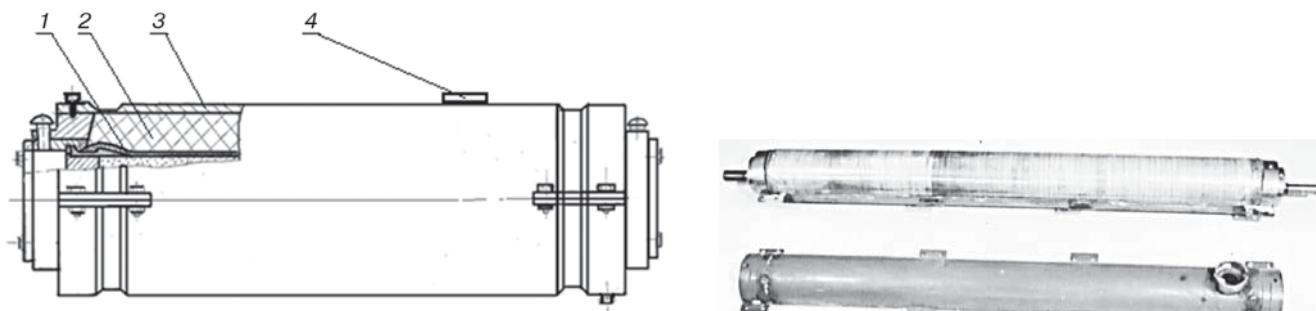


Рис. 3. Пресс-форма для заливки ТИП на прямолинейный трубопровод:

1 — силовая оболочка; 2 — теплоизолирующее покрытие; 3 — пресс-форма; 4 — штуцер для заливки смеси

[Figure 3. Mold to fill the thermal insulation coating of straight pipe:

1 — power shell; 2 — thermal insulation coating; 3 — mold; 4 — fitting for pouring the mixture]

Важнейшие физико-механические свойства ТИП «Викорт-3М» приведены в таблице.

Таблица

Физико-механические характеристики ТИП на основе пенопласта «Викорт-3М»

Показатель	Норма кажущейся плотности, кг/м ³	
	250—350	350—500
Разрушающее напряжение, МПа (не менее)	5—10	10—12
Ударная вязкость, кДж/м ² (не менее)	1,0	1,5
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,05—0,09	0,05—0,09
Горючесть по ГОСТ 12.1.044	Трудногоряемый	
Кислородный индекс, % (не менее)	33	33
Изменение размеров при 200 °С за 24 ч, % (не более)	1,0	0,5

Table

Physicomechanical characteristics of thermal insulation coating on the basis of “Vikort-3M” polyfoam

Indicator	The rate of apparent density, kg/m ³	
	250—350	350—500
Destructive stress, MPa (not less)	5—10	10—12
Impact strength, kJ/m ² (at least)	1.0	1.5
Heat conductivity coefficient, W/(m·K)	0.05—0.09	0.05—0.09
Flammability in accordance with GOST 12.1.044	Трудногоряемый	
Oxygen index, % (not less)	33	33
Size change at 200 °C in 24 hours, % (not more than)	1.0	0.5

2. Последовательность технологических операций формования ТИП

Собранная и подготовленная к заливке пресс-форма вместе с образцом трубопровода помещалась в термошкаф и подогревалась перед заливкой до температуры 370—380 К. Приготовление заливочной смеси и заливка проводились в лабораторных условиях. Составляющие компоненты отвешивались на электронных весах с точностью до 0,1 г и перемешивались с помощью электрической мешалки в течение 20 сек. Готовая смесь вводилась в пресс-форму через заливочное отверстие. Время заливки составляло 15 сек. После этого заливочное отверстие быстро закрывалось пробкой, и около 15—20 минут пресс-форма находилась в неподвижном состоянии при комнатной температуре и нормальном давлении. За это время смесь вспенивалась. Затем пресс-форма помещалась в термошкаф, в котором выдерживалась при температуре от 370 до 380 К в течение 2—3 часов для придания тепло-

изолирующему покрытию необходимых физико-механических и теплофизических свойств. Расчет навесок компонентов проводился исходя из величины внутреннего объема пресс-формы и заданной величины плотности ТИП.

Следует отметить, что при подобном нанесении ТИП на трубопроводы в процессе вспенивания пенополиуретана происходит повышение давления внутри замкнутого объема пресс-формы и на цилиндрическую поверхность изделия начинают действовать усилия всестороннего сжатия. Чтобы покрываемая оболочка не потеряла свою форму из-за потери устойчивости, необходимо внутреннюю технологическую оправку, на которой осуществлялось формование данной многослойной оболочки, удалять из изделия после окончания процесса нанесения теплоизолирующего покрытия.

3. Анализ результатов эксперимента

Для проверки работоспособности теплоизолирующего покрытия производилось циклическое захлаживание внутренней полости трубопроводов жидким водородом с замером температуры и величины теплового потока на внешней поверхности теплоизоляции.

В процессе испытаний сначала проводилось охлаждение трубопровода газообразным водородом в течение одного часа при температуре 50—80 К. Затем на один час во внутреннюю полость производилась заливка жидкого водорода с температурой 23 К, после чего в течение часа производился естественный отогрев до температуры 293 К.

Существенно более эффективным при термоциклировании оказалось покрытие из пенопласта «Викорт-3М». После 30 циклов захлаживания жидким водородом резко выраженных эффектов, свидетельствующих о разрушении теплоизолирующего покрытия, не наблюдалось.

Однако несмотря на отсутствие признаков нарушения целостности пенопластового покрытия на уровне макродефектов, регистрируемых отклонениями показаний температурных датчиков, по мере увеличения количества циклов захлаживания отмечается некоторое ухудшение его теплоизолирующих свойств, особенно после 14-го цикла. Эта особенность иллюстрируется графиком на рис. 4, где представлены величины теплопритока Q и температуры T наружной стенки испытываемого трубопровода в зависимости от количества проведенных термоциклов.

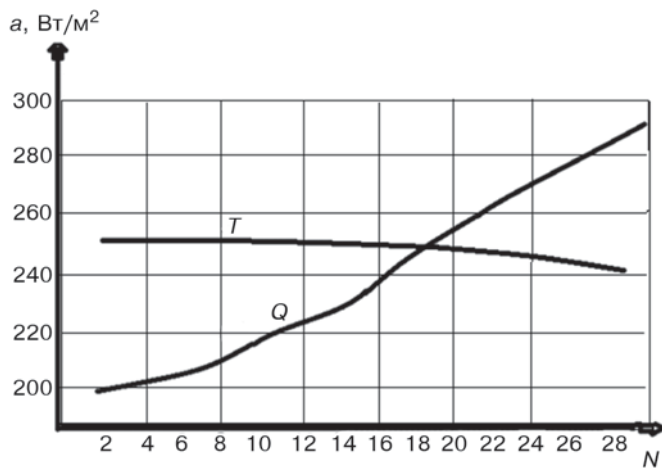


Рис. 4. Зависимость температуры и теплового потока оболочки с ТИП «Викорт-3М» от количества циклов захлаживания [Figure 4. Dependence of temperature and heat flux of the shell with the thermal insulation coating “Vikort-3M” on the number of cooling cycles]

Выводы

По результатам выполненных экспериментальных исследований могут быть сделаны следующие выводы:

1. С целью уменьшения теплопритоков из внешней среды к поверхности криогенных трубопроводов предпочтительнее использовать заливочные пенопласты с закрытой пористостью типа «Викорт-3М».

2. Для существенного уменьшения явления криоподсоса при резком изменении перепада температуры теплоизолирующего покрытия у криогенных трубопроводов при заправке и заливке топлива типа жидкого водорода следует тщательно герметизировать внешнюю поверхность ТИП.

3. Внутреннюю технологическую оправку, используемую для формования композитного криогенного трубопровода, следует удалять из его полости только после окончания процесса нанесения теплоизолирующего слоя.

Список литературы

- [1] Вспененные пластические массы: каталог / под ред. В.В. Салия. Черкассы, 1988.

- [2] *Вигли Д.А.* Механические свойства материалов при низких температурах. М.: Мир, 1974. 376 с.
- [3] Справочник по физико-техническим основам криогеники / М.П. Малков, И.Б. Данилов, А.Г. Зельдович, А.Б. Фрадков / под ред. М.П. Малкова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1985. 432 с.
- [4] *Кузнецов В.М., Нехороших Г.Е.* Экспериментальные исследования проницаемости газов через стенки оболочек, выполненных из пластиков, армированных пленочными наполнителями // Все материалы: энциклопедический справочник с приложением «Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам». 2013. № 7. С. 53–57.
- [5] *Нехороших Г.Е.* Опыт применения полимерных пленочных материалов в конструкции криогенного разгонного блока «12КРБ» // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2017. Т. 18. № 3. С. 318–324.
- [6] Установки и системы криогенной техники: сборник научных трудов / под ред. В.И. Сухова. Балашиха: НПО «Криогенмаш», 1989. 146 с.
- [7] *Архаров А.М., Кунис И.Д.* Криогенные заправочные комплексы стартовых ракетно-космических комплексов / под ред. И.В. Бармина. М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2006. 197 с.
- [8] Röchling Group. URL: roechling.com/industrial/characteristics/cryogenic-insulation-materials
- [9] *Нехороших Г.Е.* Технология изготовления заправочных патрубков для сжиженного природного газа из ПКМ // Все материалы: энциклопедический справочник. 2013. № 5. С. 15–21.
- [10] *Крутько Э.Т., Прокопчук Н.Р.* Перспективные пути создания новых термостойких материалов на основе полиимидов // Труды БГТУ. Химия, технология органических веществ и биотехнологии. 2013. № 4. С. 145–149.
- [11] *Бейдер Э.Я., Гуреева Е.В., Петрова Г.Н.* Пенополиимиды // Все материалы: энциклопедический справочник. 2012. № 6. С. 2–8.
- [12] ТУ 6-55-221-934-89. Компонент А1-викорт-3М. 1989. 8 с.

Для цитирования:

Нехороших Г.Е. Экспериментальные исследования работоспособности теплозащитного слоя композитных трубопроводов при захлаживании жидким водородом // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 1. С. 7–13. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-7-13

Experimental studies of the performance of the heat-shielding layer of composite pipelines during cooling with liquid hydrogen

Gennady E. Nekhoroshikh*

N.E. Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology), 5 2nd Baumanskaya St., bldg. 1, Moscow, 105005, Russian Federation

Article history:

Received: December, 12 2018

Revised: January 19, 2019

Accepted: January 30, 2019

Keywords:

cryogenic fuel;
thermal insulation coating;
liquid hydrogen;
cyclic cooling and heating;
technological process;
equipment

The development of technology for aircraft and rocket engines more efficient and environmentally friendly cryogenic fuels in the form of liquefied gases: hydrogen (vinyl), oxygen (oxide), natural gas (methane), required the creation of pipelines from modern composite materials, as well as new thermal insulation coatings (TIC), providing reliable protection of these highways from external heat leakage. Fuel out-of-flight manifolds of reusable aircraft require a particularly reliable TIC, since during the operation of the product, their multi-cycle cooling down occurs when pouring cryogenic fuel into the pipelines and heating at the discharge. Thermally insulating coatings in the form of polyurethane foam (PUF), applied to the surface of the protected product, by spraying or pouring a mixture of the constituent components, which are widely used at the present time, are not fully suitable for cryogenic pipelines due to the deterioration of their heat insulating properties in the process of cyclic cooling. The aim of the work is to create a new design and technological solution that ensures the performance of the TIC in the conditions of high-cycle thermal loading. In connection with the prospect of using cryogenic fuels in an aviation (reusable) technology, ensuring the performance of a TIC in such conditions is relevant. For the developed technology, experimental determination of the main parameters of the TIC was carried out. Composite pipelines of curvilinear and rectilinear shape were used as objects of research. The pipeline design included a sealing film sheath, a power sheath made of a polymer composite material, a foam heat insulating coating and metal connecting flanges. On model composite samples of cryogenic pipelines, cyclic tests for cooling with liquid hydrogen (filling of fuel lines) and heating to ambient temperature (draining components) were carried out. During the tests, the pipeline was first cooled with hydrogen gas for one hour. Then, for one hour, liquid hydrogen was poured into the internal cavity, after which natural warming up to a normal temperature was carried out for an hour.

The obtained results allowed to determine the dependence of temperature and heat flow of the shell with TIC on the number of cooling cycles, to propose a design and technological solution for a significant reduction of the cryopump at large temperature differences in the TIC, to show the effectiveness of cyclic cooling of foam porosity with closed porosity of the “Vikort-3M”

References

- [1] Saliy V. (ed.). *Vspennnyye plasticheskie massy [Foamed plastics: catalog]*. Cherkasy; 1988. (In Russ.)
- [2] Wigley DA. *Mekhanicheskie svoystva materialov pri nizkikh temperaturahs [Mechanical properties of materials at low temperatures]*. Moscow: Mir Publ.; 1974. (In Russ.)
- [3] Malkov MP, Danilov IB, Zeldovich AG, Fradkov AB. *Spravochnik po fiziko-tekhnicheskim osnovam kriogeniki [Handbook on the physico-technical basics of cryogenics]*. 3rd ed. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 1985. (In Russ.)
- [4] Kuznetsov VM, Nekhoroshikh GE. Eksperimental'nye issledovaniya pronicaemosti gazov cherez stenki obolochek, vpolnennykh iz plastikov, armirovannykh plenochnymi napolnityami [Experimental studies of the permeability of gases through the walls of shells made of plastics reinforced with film fillers]. *Vse materialy: entsiklopedicheskii spravochnik s prilozheniem “Kommentarii k standartam, TU, sertifikatam” [All materials: encyclopedic reference book with the appendix “Comments on standards, specifications, certificates”]*. 2013;(7): 53—57. (In Russ.)
- [5] Nekhoroshikh GE. Opyt primeneniya polimernykh plynochnykh materialov v konstrukcii kriogenogo razgonnogo bloka “12KRB” [Experience in the use of polymeric film materials in the construction of a cryogenic upper stage “12KRB”]. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2017;18(3): 318—324. (In Russ.)

* Associate Professor of the Rocket and Space Composite Structures Department, Candidate of Technical Sciences; nekhor47ge@mail.ru

- [6] *Ustanovki i sistemy kriogennoj tekhniki: sbornik nauchnyh trudov* [Cryogenic equipment installations and systems: collection of scientific papers]. Sukhova VI (ed.). Balashikha: NGO “Cryogenmash” Publ.; 1989. (In Russ.)
- [7] Arkharov AM, Kunis ID. *Kriogennye zapravochnye komplekсы startovyh raketno-kosmicheskikh komplekсов* [Cryogenic filling complexes of launch rocket-space complexes]. Moscow: Publishing House of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman; 2006. (In Russ.)
- [8] Röchling Group. URL: roechling.com/industrial/characteristics/cryogenic-insulation-materials
- [9] Nekhoroshikh GE. Tekhnologiya izgotovleniya zapravochnyh trubkov dlya szhizhennogo prirodnogo gaza iz PKM [Manufacturing technology of filling pipes for liquefied natural gas from PKM]. *Vse materialy: enciklopedicheskij spravochnik* [All materials: encyclopedic reference]. 2013;(5): 15–21. (In Russ.)
- [10] Krutko ET, Prokopchuk NP. Perspektivnye puti sozdaniya novyh termostojkih materialov na osnove poliimidov [Perspective ways of creating new heat-resistant materials based on polyimides]. *Trudy BGTU. Himiya, tekhnologiya organicheskikh veshchestv i biotekhnologii* [Proceedings of BSTU. Chemistry, technology of organic substances and biotechnology]. 2013;(4): 145–149. (In Russ.)
- [11] Beyder EYa, Gureeva EV, Petrova GN. Penopoliimidy [Penopoliimidy]. *Vse materialy: enciklopedicheskij spravochnik* [All materials: encyclopedic reference]. 2012;(6): 2–8. (In Russ.)
- [12] *TU 6-55-221-934-89. Component A1-Vikort-3M*. 1989. (In Russ.)

For citation:

Nekhoroshikh GE. Experimental studies of the performance of the heat-shielding layer of composite pipelines during cooling with liquid hydrogen. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(1): 7–13. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-7-13 (In Russ.)



Научная статья

DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-14-19

УДК 621.436

Влияние температур низкопотенциального источника и потребителя теплоты на эффективность теплового насоса

Ю.А. Антипов*, К.В. Шкарин†, И.И. Шаталова‡, С.А. Егоров§, Н.У. Матякубова**

Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

История статьи:

Поступила: 12 декабря 2018

Доработана: 19 января 2019

Принята: 30 января 2019

Ключевые слова:

тепловой насос;

экспериментальная установка;

коэффициент преобразования

В статье приводятся описание экспериментальной установки для испытания теплового насоса и результаты его работы при различных температурах низкопотенциального источника теплоты и теплопотребителя. От значений этих температур в значительной степени зависит эффективность теплового насоса. Теоретическое определение параметров эффективности дает широкий разброс параметров теплового насоса из-за сложности определения внешних и внутренних потерь, поэтому экспериментальное исследование работы теплового насоса при различных температурных условиях является актуальной задачей. Главным показателем эффективности теплового насоса служит коэффициент преобразования (отношение отданной теплопотребителю теплоты к затраченной в компрессоре работе). Для определения достоверной величины коэффициента преобразования проведены испытания компрессионного теплового насоса. В качестве рабочего тела использовался хладагент R-142b. Установлено, что при увеличении температуры теплопотребителя коэффициент преобразования теплового насоса резко падает. Также коэффициент преобразования теплового насоса понижается при уменьшении температуры низкопотенциального источника теплоты.

Введение

Тепловые насосы (ТН) получили широкое распространение в мире [1—4]. К настоящему времени масштабы их внедрения довольно значительны. Они применяются как для целей теплоснабжения

[5], так и в промышленности [6]. Например, в Швеции 50 % всего отопления обеспечивают ТН. В Германии предусмотрена существенная дотация государства на установку ТН, в США ежегодно их производится около 1 млн и более 30 % домов

* Доцент департамента машиностроения и приборостроения, Инженерная академия, к.т.н., доцент; rudntit@yandex.ru

† Ассистент департамента машиностроения и приборостроения, Инженерная академия

‡ Доцент департамента инженерного бизнеса и менеджмента, Инженерная академия, к.с.-х.н

§ Студент департамента машиностроения и приборостроения, Инженерная академия

** Студент департамента машиностроения и приборостроения, Инженерная академия

© Антипов Ю.А., Шкарин К.В., Шаталова И.И., Егоров С.А., Матякубова Н.У., 2019



оборудованы установками с ТН, в Стокгольме 12 % всего отопления города обеспечивается с помощью ТН [7]. Но даже в промышленно развитых странах, где ТН находят массовое применение, уровень их развития не отвечает потенциальным возможностям [8].

В России теплонасосная техника пока находится в стадии опытно-промышленного освоения [9–13]. Такое отставание неоправданно для нашей страны, где в условиях роста цен на топливо, тяжелой экологической обстановки во многих городах, при большой продолжительности отопительного периода преимущества ТН в качестве теплоисточников могут быть реализованы с наибольшей полнотой. Причины сложившегося положения с теплонасосной техникой, по мнению В.П. Проценко [14], заключаются в следующем:

- последовательная многолетняя ориентация на первоочередное развитие теплофикации;
- отнесение вопросов, связанных с децентрализованным теплоснабжением, к разряду второстепенных;
- отсутствие механизмов, стимулирующих внедрение ресурсосберегающих технологий и развитие новой техники;
- отсутствие крупных программ и системных исследований, направленных на раскрытие потенциальных возможностей ТН (отсюда и их недооценка).

Приведенный перечень причин можно дополнить другими, общими для всех стран. Одна из них — исторически сложившийся подход к ТН как к одному из видов холодильной техники, что зачастую приводит к созданию неоптимизированных по термодинамическим, схемным и конструктивным решениям агрегатов, недоиспользованию потенциала ТН [15; 16].

1. Определение коэффициента преобразования расчетным путем

Коэффициент преобразования μ теплового насоса является главным параметром (применяются также названия — коэффициент трансформации, отопительный коэффициент), характеризующим его эффективность. Величина μ — это отношение тепловой мощности (теплового потока) Q , вырабатываемой ТН, к мощности N , затрачиваемой на привод компрессора, определяемая по выражению

$$\mu = \frac{Q}{N} = \frac{G_B (t_{B2} - t_{B1}) t_{PB}}{G (i_{2ад} - i_1) / \eta_k}, \quad (1)$$

где G_B и G — расходы воды, охлаждающей конденсатор и рабочее тело ТН; t_{B1} и t_{B2} — температуры охлаждающей воды на входе и выходе из конденсатора; i_1 — энтальпия рабочего тела ТН на входе в компрессор; $i_{2ад}$ — энтальпия рабочего тела при адиабатическом сжатии на выходе из компрессора; η_k — КПД компрессора, $\eta_k = \eta_i \eta_M$, $\eta_i \eta_M$ — внутренний и механический КПД компрессора.

Для определения μ из (1) необходимо нанести рабочий цикл ТН на T, S -диаграмму, определить величины энтальпий и подсчитать теплоту, получаемую в конденсаторе, переохладителе и испарителе [4].

Для приближенных расчетов по определению μ можно использовать уравнение:

$$\mu = \mu_t \cdot \eta, \quad (2)$$

где μ_t — теоретический коэффициент преобразования обратного цикла Карно:

$$\mu_t = \frac{T}{T - T_0} = \frac{T}{\Delta T}, \quad (3)$$

где T и T_0 — температуры высокотемпературного и низкотемпературного источников теплоты.

Коэффициент η зависит от многих факторов, учитывает внешние и внутренние потери и лежит в пределах 0,45–0,65. Внутренние потери связаны с процессами состояния хладагента внутри установки (потери в дросселе и компрессоре). Внешние потери замыкаются на процессы теплообмена хладагента с верхним и нижним источниками тепла в испарителе и конденсаторе [18; 19].

При температуре низкотемпературного источника $T_0 = 283 \text{ K} = 10^\circ \text{C}$, $T = 323 \text{ K} = 50^\circ \text{C}$, $\Delta T = 40 \text{ K}$ величина $\mu_t = 8,05$.

Если коэффициент потерь $\eta = 0,6$, то коэффициент преобразования $\mu = \eta \cdot \mu_t = 4,82$.

Сравним два варианта: первый ТН обеспечивает радиаторное отопление жилого помещения ($T = 50^\circ \text{C} = 323 \text{ K}$), а второй ТН применяется при низкотемпературном (напольном) отоплении ($T = 35^\circ \text{C} = 308 \text{ K}$). Температура нижнего источника одинакова: $T_0 = 283 \text{ K} = 10^\circ \text{C}$. Коэффициент преобразования μ по формуле (2):

$$\mu_{\text{рад}} = 4,82; \mu_{\text{нап}} = 7,3.$$

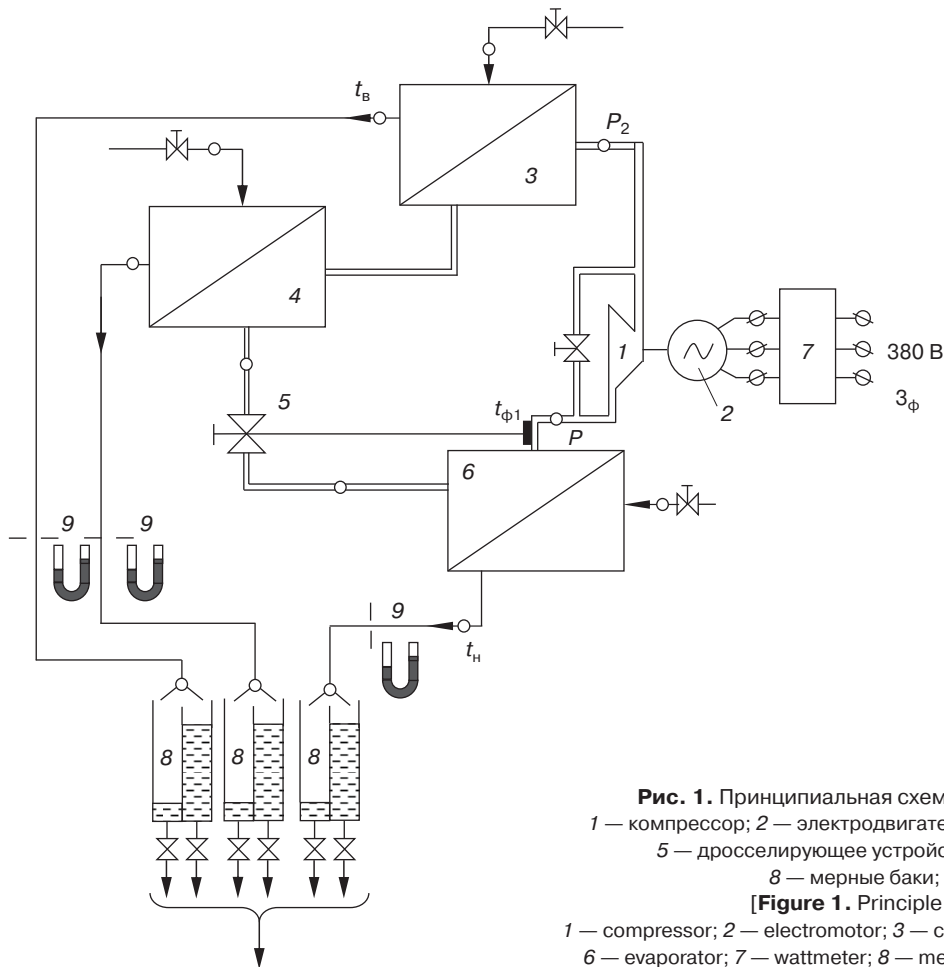


Рис. 1. Принципиальная схема для испытания теплового насоса:

- 1 — компрессор; 2 — электродвигатель; 3 — конденсатор; 4 — переохладитель;
5 — дросселирующее устройство; 6 — испаритель; 7 — ваттметр;
8 — мерные баки; 9 — мерные диафрагмы

[Figure 1. Principle circuit for heat pump test:

- 1 — compressor; 2 — electromotor; 3 — condenser; 4 — overcooler; 5 — throttling device;
6 — evaporator; 7 — wattmeter; 8 — measuring tanks; 9 — the measuring diaphragm]

Таким образом, при напольном отоплении помещения по сравнению с радиаторным отоплением использование ТН становится более эффективным в более чем 1,5 раза.

Конечно, надежную величину μ может дать только эксперимент. С этой целью в лаборатории департамента машиностроения и приборостроения РУДН были проведены испытания теплового насоса.

Схема испытательного стенда показана на рис. 1.

Компрессор (1) приводится в действие асинхронным электродвигателем (2) мощностью 2,5 кВт. Выход компрессора присоединен ко входу в конденсатор (3), который последовательно через переохладитель (4), дросселирующее устройство (5) и испаритель (6) подключен ко входу компрессора (1). К электродвигателю (2) подключен ваттметр (7). Через второй контур конденсатора (3), переохладителя (4) и испарителя (6) проходит охлаждающая вода, расход которой можно определить соответственно тремя мерными баками (8) и тремя мерными диафрагмами (9).

2. Основные данные экспериментальной установки

Компрессор — одноступенчатый, двухцилиндровый, потребляемая мощность — 2,5 кВт, максимальное давление на выходе — 1,7 МПа, расход — 80 л/мин, заправка — рабочий агент фреон — 3,5 кг, объемная производительность 10 м³/ч, диаметр поршня 35 мм, ход поршня 32,4 мм. В картере компрессора расположен электронагреватель, который подогревает масло в момент пуска компрессора после его длительного простоя.

Конденсатор — горизонтальный кожухотрубный теплообменник с накатными медными трубками общей площадью 1,75 м², развальцованными в трубных досках. С торцов конденсатор закрыт водяными крышками с расположенными в них перепускными каналами, обеспечивающими 12-кратное прохождение охлаждающей воды в рабочей полости конденсатора. Максимальное давление рабочего агента в конденсаторе равно 1,5 МПа, охлаждаю-

шей воды 0,6 МПа. Допустимый рабочий диапазон температуры для рабочего агента t_{ϕ} лежит в пределах 275–373 К, для воды $t_{\text{в}}$ и $t_{\text{н}}$ — 275–323 К.

Испаритель — конструктивно выполнен так же, как и конденсатор.

Таблица/Table

Основные данные фреона R-142b
[Basic data of freon R-142b]

Химическая формула [Chemical formula]	$\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2\text{Cl}$
Молекулярная масса [Molecular weight]	100,48
Газовая постоянная, Дж/кг К [Gas constant]	82,74
Нормальная температура насыщения*, °C [Normal saturation temperature]	-9,21
Критическая температура, °C [Critical temperature]	136,45
Критическое давление, МПа [Critical pressure]	4,138
Показатель адиабаты [Adiabatic index]	1,135
Коэффициент Трутона, mr_s/T_s [Trouton's Ratio]	20,28
Число Гильдберга, $T_{\text{кр}}/T_s$ [The Number of Guldberg]	1,55

* — при давлении 0,1013 МПа.

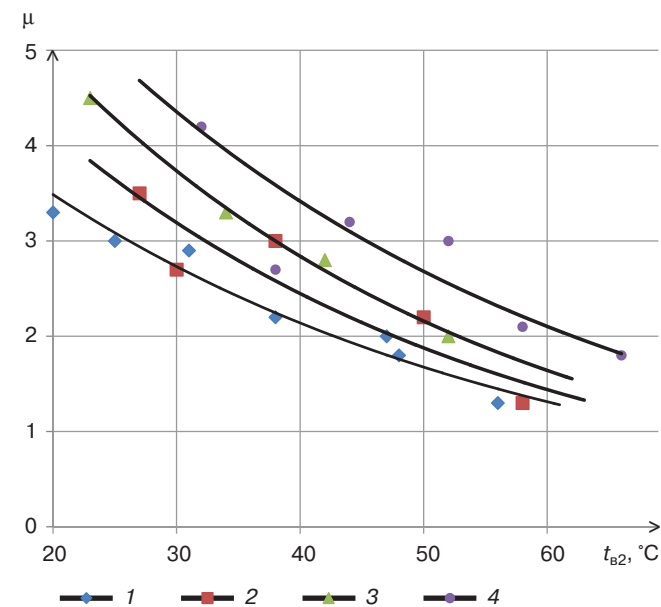


Рис. 2. Зависимость коэффициента преобразования от температуры верхнего источника теплоты $t_{\text{в}2}$ при различных температурах нижнего источника теплоты $t_{\text{н}1}$:
1 — 15 °C; 2 — 18 °C; 3 — 20 °C; 4 — 25 °C

[Figure 2. The dependence of the conversion efficiency on the temperature of the upper heat source $t_{\text{в}2}$ at different temperatures of the lower heat source $t_{\text{н}1}$:
1 — 15 °C; 2 — 18 °C; 3 — 20 °C; 4 — 25 °C]

Исследовалась работа ТН на рабочем агенте R-142b, физические свойства которого представлены в таблице. Результаты испытаний показаны на рис. 2.

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента преобразования теплового насоса от температуры горячего и холодного источников теплоты.

Выводы

Из данных, приведенных на рис. 2, следует:

1) при увеличении температуры верхнего источника (температуры воды, поступающей потребителю) коэффициент преобразования ТН резко падает, так, при повышении температуры теплопотребителя с 40 до 60 °C μ уменьшается с 3,4 до 2,2, то есть на 35 %;

2) с повышением температуры нижнего источника (вода, поступающая в испаритель) μ увеличивается. Так, при $t_{\text{в}2} = 40$ °C и температуре $t_{\text{н}1} = 15$ °C коэффициент преобразования $\mu = 2,2$, а при температуре $t_{\text{н}1} = 25$ °C коэффициент преобразования $\mu = 3,4$, то есть увеличивается на 35 %.

Список литературы

- [1] Андрющенко А.И. Возможная экономия топлива от использования утилизационных ТНУ в системах энергосбережения предприятий // Промышленная энергетика. 2003. № 2. С. 7–10.
- [2] Воздушные тепловые насосы. М.: Аква-Терм, 2012. 92 с.
- [3] Кулаковский А.И., Новиков В.И., Червяков С.С. Ремонт и эксплуатация холодильных установок. М.: Высшая школа, 1992. 256 с.
- [4] Быков А.В., Калнинь И.М., Крузе А.С. Холодильные машины и тепловые насосы. М.: Агропромиздат, 1988. 287 с.
- [5] Хайнрих Г. Теплонасосные установки для отопления и горячего водоснабжения. М.: Стройиздат, 1985. 351 с.
- [6] 9th International IEA Heat Pump Conference. Large scale industrial heat pumps — market analysis, potentials, barriers and best-practice examples. Zurich, Switzerland, 2008.
- [7] Бараненко А.В., Бухарин Н.Н., Пекарев В.И., Тимофеевский Л.С. Холодильные машины: учебник для студентов вузов специальности — «Техника и физика низких температур». СПб.: Политехника, 2006. 944 с.
- [8] Фортвов В.Е., Шпильрайн Э.Э. Энергия и энергетика. М.: Букос, 2004. 76 с.
- [9] Смордин А.И., Паршин С.А. Оптимизация состава холодильного агента низкотемпературной ступени цикла на двойном смешанном хладагенте // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2018. № 7. С. 21–25.
- [10] Малафеев И.И., Маринюк Б.Т., Ильин Г.А. Разработка и расчетно-экспериментальное исследование теплового насоса для систем вакуумной дистилляции воды //

- Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2018. № 9. С. 24—28.
- [11] Шаталов И.К., Антипов Ю.А., Дубенцов К.Г. Применение цикла Лоренца в тепловых насосах // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2017. № 11. С. 23—24.
- [12] Антипов Ю.А., Патрахальцев Н.Н., Ощепков П.П., Шаталов И.К., Шаталова И.И. Повышение эффективности когенерационной установки на базе газового двигателя внутреннего сгорания // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. 2018. Т. 17. № 11. С. 504—506.
- [13] Проценко В.П. Ресурсо- и природосберегающая энергетика России // Энергосбережение и водоподготовка. 2017. № 5 (109). С. 6—15.
- [14] Шаталов И.К. Теплонасосные установки с приводом от тепловых двигателей: учебное пособие. М.: РУДН, 2009. 94 с.
- [15] Yuguo Wu, Yake Jiang, Bo Gao, Zhigang Liu, Jing Liu. Thermodynamic analysis on an instantaneous water heating system of shower wastewater source heat pump // Journal of Water Reuse and Desalination. 2018. No. 8 (3). Pp. 404—411.
- [16] Kurtz-Orecka K., Tuchowski W. Combined heat pump-district heating network energy source // E3S Web of Conferences. 2018. 49. 00063.
- [17] Wołoszyn J., Golaś A. Coefficient of Performance Stabilisation in Ground Source Heat Pump Systems // Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. 2017. No. 5 (4). Pp. 645—656.
- [18] Бараненко А.В., Бухарин Н.Н., Пекарев В.И., Тимофеевский Л.С. Холодильные машины. СПб.: Политехника, 2006. 933 с.
- [19] Ibrahim Dincer. Comprehensive Energy Systems. 2018. Vol. 2. Pp. 435—474.

Для цитирования:

Антипов Ю.А., Шкарин К.В., Шаталова И.И., Егоров С.А., Матякубова Н.У. Влияние температур низкопотенциального источника и потребителя теплоты на эффективность теплового насоса // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 1. С. 14—19. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-14-19

Research paper

Influence of temperatures of a low-potential source and heat consumer on the efficiency of a heat pump

Yuriy A. Antipov*, Kirill V. Shkarin†, Irina I. Shatalova‡, Semen A. Egorov§, Nargiza U. Matyakubova**

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation

Article history:

Received: December 12, 2018

Revised: January 19, 2019

Accepted: January 30, 2019

Keywords:

heat pump;
coefficient of performance;
experimental setup

The article describes the experimental setup for testing a heat pump and the results of its operation at various temperatures at its inlet and outlet. An actual task is to study the operation of a heat pump under various boundary conditions, which are determined from the phase transition temperature in the evaporator and condenser. These temperatures depend on the temperature in the evaporator of a low-potential source of heat (the lower source is water, air, etc.) and the temperature in the condenser of a high-potential source of heat (the upper source is a consumer). The main indicator of the efficiency of the heat pump is the coefficient of performance. To determine the reliable value of the coefficient of performance, tests of compression heat pump were carried out. Refrigerant R-142b was used as a working fluid. Based on the experimental data, the dependences of the coefficient of performance on the temperature of the hot and cold heat source are constructed. Also, the coefficient of performance heat pump decreases when the lower heat source decreases.

*Associate Professor of Department of Mechanical and Instrument Engineering, Academy of Engineering, Candidate of Technical Sciences; rudn-tit@yandex.ru

† Assistant of Department of Mechanical and Instrument Engineering, Academy of Engineering

‡ Associate Professor of Department of Engineering Business and Management, Academy of Engineering, Candidate of Agricultural Sciences

§ Graduate student of Department of Mechanical and Instrument Engineering, Academy of Engineering

** Graduate student of Department of Mechanical and Instrument Engineering, Academy of Engineering

References

- [1] Andryushchenko AI. Vozmozhnaya ekonomiya topliva ot ispol'zovaniya utilizatsionnykh TNU v sistemakh energosberezheniya predpriyatii [Possible fuel economy from the use of utilization of heat pumps in energy-saving systems of enterprises]. *Industrial Energy*. 2003;(2): 3–7. (In Russ.)
- [2] *Vozdushnye teplovye nasosy [Air heat pumps]*. Moscow: Publishing Center “Aqua-Therm”; 2012. (In Russ.)
- [3] Kulakovskij AI, Novikov VI, Chervyakov CC. *Remont i ekspluatatsiya kholodil'nykh ustanovok [Repair and maintenance of refrigeration]*. Moscow: Vysshaya Shkola Publ.; 1992. (In Russ.)
- [4] Bykov AV, Kalnin IM, Kruze AS. *Kholodil'nye mashiny i teplovye nasosy [Refrigerating machines and heat pumps]*. Moscow: Agropromizdat Publ.; 1988. (In Russ.)
- [5] Khainrikh G. *Teplonasosnye ustanovki dlya otopeniya i goryachego vodosnabzheniya [Heat pump installations for heating and hot water supply]*. Moscow: Stroiizdat Publ.; 1985. (In Russ.)
- [6] *9th International IEA Heat Pump Conference. Large scale industrial heat pumps — market analysis, potentials, barriers and best-practice examples*. Zurich, Switzerland; 2008.
- [7] Baranenko AV, Buharin NN, Pekarev VI, Timofeevskij LS. *Kholodil'nye mashiny: uchebnyk dlya studentov vuzov spetsial'nosti “Tekhnika i fizika nizkikh temperature” [Refrigerating machines: a textbook for students of technical colleges of the specialty “Technique and physics of low temperatures”]*. Saint Petersburg: Politekhnik Publ.; 2006. (In Russ.)
- [8] Fortov VE, Spielrain EE. *Energiya i energetika [Energy and energetics]*. Moscow: Boocos Publ.; 2004. (In Russ.)
- [9] Smordin AI, Parshin SA. Optimizatsiya sostava kholodil'nogo agenta nizkotemperaturnoi stupeni tsikla na dvoimom smeshannom khladagente [Optimization of the composition of the refrigerant low-temperature stage of the cycle on a double mixed refrigerant]. *Chemical and Petroleum engineering*. 2017;(7): 21–25.
- [10] Malafeev II, Marinyuk BT, Ilyin GA. Razrabotka i raschetno-eksperimental'noe issledovanie teplovogo nasosa dlya sistem vakuumnoi distillyatsii vody [Development and design and experimental study of a heat pump for vacuum water distillation systems]. *Chemical and Petroleum engineering*. 2017;(9): 24–28.
- [11] Shatalov IK, Antipov YuA, Dubentsov KG. Primenenie tsikla Lorentsa v teplovykh nasosakh [Application of Lorentz cycle in heat pumps]. *Chemical and Petroleum engineering*. 2017;(11): 23–24.
- [12] Antipov YuA, Patrakhaltsev NN, Oschepkov PP, Shatalov IK, Shatalov II. Povyshenie effektivnosti kogeneratsionnoi ustanovki na baze gazovogo dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Improving the efficiency of the cogeneration plant based on the gas internal combustion engine]. *Autogas filling complex + Alternative fuel*. 2018;17(11): 504–506.
- [13] Protsenko VP. Resurso- i prirodosberegayushchaya energetika Rossii [Resource and environmental energy of Russia]. *Energy saving and water treatment*. 2017;(5): 6–15. (In Russ.)
- [14] Shatalov IK. *Teplonasosnye ustanovki s privodom ot teplovykh dvigatelei: uchebnoe posobie [Heat pump installations driven by heat engines: textbook]*. Moscow: RUDN Publ.; 2009. (In Russ.)
- [15] Yuguo Wu, Yake Jiang, Bo Gao, Zhigang Liu, Jing Liu. Thermodynamic analysis on an instantaneous water heating system of shower wastewater source heat pump. *Journal of Water Reuse and Desalination*. 2018;8(3): 404–411.
- [16] Kurtz-Orecka K, Tuchowski W. Combined heat pump-district heating network energy source. *E3S Web of Conferences*. 2018;(49): 00063.
- [17] Wołoszyn J, Gołaś A. Coefficient of Performance Stabilisation in Ground Source Heat Pump Systems. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*. 2017;5(4): 645–656.
- [18] Baranenko AV, Bukharin NN, Pekarev VI, Timofeevskij LS. *Kholodil'nye mashiny [Refrigerating machines]*. Saint Petersburg: Politekhnik Publ.; 2006. (In Russ.)
- [19] Ibrahim Dincer. *Comprehensive Energy Systems*. 2018;(2): 435–474.

For citation

Antipov YA, Shkarin KV, Shatalova II, Egorov SA, Matyakubova NU. Influence of temperatures of a low-potential source and heat consumer on the efficiency of a heat pump. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(1): 14–19. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-14-19 (In Russ.)



Научная статья

DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-20-27

УДК 67-08

Применение универсального ультразвукового реактора для переработки концентратов руд редкоземельных металлов

М.Ю. Малькова*, А.Н. Задиранов†

Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, Миклухо-Маклая, 6

История статьи:

Поступила: 16 декабря 2018

Доработана: 25 января 2019

Принята: 29 января 2019

Ключевые слова:

редкоземельные элементы;

концентрат;

выщелачивание;

ультразвуковой реактор;

проточная камера

В последние годы в тяжелой промышленности стремительно возрос интерес к редкоземельным металлам (РЗМ). Одновременно поставлены новые задачи по полноте извлечения и качеству (чистоте) самих РЗМ. Обеспечение новых требований к качеству РЗМ может быть достигнуто двумя современными методами переработки руды. Первый способ — традиционное выщелачивание, но с применением современных ультразвуковых реакторов проходного типа отечественного производства. Второй способ — выщелачивание с применением дорогих импортных импрегнированных сорбентов, требующих специальной утилизации после проведения процесса осаждения нужной фракции материала. Недостатком ультразвуковых аппаратов для обработки РЗМ руд является то, что назначенные параметры рабочей камеры (длина и диаметр) рассчитываются для конкретного вида обрабатываемой руды, поэтому действующие в металлургической промышленности ультразвуковые реакторы нельзя применять для обработки всех видов руд РЗМ.

Целью работы является изучение эффективности переработки концентратов руд, содержащих редкоземельные элементы, методом выщелачивания с применением универсального ультразвукового реактора, пригодного для переработки различных концентратов, содержащих редкоземельные элементы. В работе щелочная обработка руды осуществляется в ультразвуковом реакторе специальной конструкции, допускающей регулирование размеров рабочего пространства реактора. Это позволяет осуществлять настройку реактора на высокоэффективную обработку руды при различной исходной концентрации ценных компонентов. Как показали результаты проведенных экспериментов, извлечение РЗМ и других ценных компонентов руды в ультразвуковом реакторе такой конструкции составляет не менее 98,3 %.

Введение

С каждым годом в различных областях науки и техники все в больших количествах применяются

редкоземельные элементы (РЗЭ) [1—5]. Особенно отчетливо эта тенденция проявляется в последние 10—15 лет. В указанный период мировой рынок РЗЭ увеличился более чем в 1,5 раза: с 80,0 тыс. т в

* Профессор департамента строительства, Инженерная академия, д.т.н., профессор; marianna300@yandex.ru

† Профессор департамента строительства, Инженерная академия, д.т.н., профессор

© Малькова М.Ю., Задиранов А.Н., 2019



2000 году до 130,0 тыс. т в настоящее время. При этом прогнозируется, что к 2020 году объем мирового спроса на РЗЭ вырастет еще больше и составит порядка 185 тыс. т.

Столь быстрый рост потребления обусловлен многими уникальными физическими и химическими свойствами РЗЭ и их соединений оптического, магнитного, электрического характера и др. Постоянно растет поток научно-технических исследований по практическому использованию материалов, содержащих редкоземельные элементы, что стимулирует дальнейшее быстрое развитие производства РЗЭ и материалов на их основе. Это в свою очередь в значительной мере характеризует уровень развития науки и техники страны, особенно новейших высокотехнологичных отраслей, таких как электроника, приборостроение, авиакосмическая, оборонная, машиностроительная промышленность.

В этой связи насущной потребностью сегодняшнего дня является разработка высокоэффективных технологий и комбинированных схем переработки различного сырья, содержащего РЗЭ, с тем чтобы достойным образом конкурировать с ведущими фирмами мира в создании РЗЭ высокой чистоты [6–10].

Известно [11–18], что при гидрометаллургической обработке чистота РЗЭ и их наиболее полное извлечение из руд и концентратов обусловлено аппаратурой, предназначенной для этих целей. В последние годы при проведении процесса выщелачивания (как головной операции переработки руд, содержащих РЗЭ) широко применяют аппараты ультразвуковой проточной обработки сырья [19–21]. Эти аппараты призваны обеспечить наименьшие потери РЗЭ при их извлечении в раствор. Они надежно себя зарекомендовали, хотя имеют существенные недостатки. Например, габаритные размеры (длина и диаметр камер) рассчитываются для конкретного вида обрабатываемой среды (руды), что исключает возможность применения ультразвуковых устройств для одинаково эффективной обработки различных сред.

Существует два пути решения данной задачи. Первый заключается в необходимости пристраивания к работающему аппарату дополнительных камер, что резко усложняет его конструкцию и эксплуатацию. Другой путь связан с разработкой универсальных устройств, способных эффективно перерабатывать различные типы концентратов руд, содержащих РЗЭ. Второму направлению поиска посвящена настоящая работа.

Целью исследования является изучение эффективности переработки концентратов руд, содержащих РЗЭ, методом выщелачивания с применением универсального ультразвукового реактора, пригодного для переработки различных концентратов, содержащих РЗЭ.

1. Материалы и методы

В работе использовалось специальное устройство, представляющее собой проточную камеру ультразвукового реактора, выполненную в виде полого цилиндра с возможностью размещения внутри нее стержня излучателя ультразвуковых колебаний. Камера также содержит входной и выходной патрубки, предназначенные для подачи суспензии сырья и извлечения из нее готового продукта. Для стабилизации надежной работы камеры внутрь нее вставлена цилиндрическая втулка, а в нижней части камеры установлены диск со сквозным отверстием в центре и кольца, расположенные одно над другим и фиксирующие положение втулки и диска в продольном направлении.

Техническим результатом такой конструкции является возможность регулирования размеров рабочего пространства проточной камеры, а вместе с ней и размеров рабочего пространства ультразвукового реактора, что позволяет в различных вариантах настройки использовать камеру для обработки различных видов природного и техногенного минерального сырья с высокой степенью извлечения ценных компонентов.

На рисунке схематично представлены различные варианты настройки (подготовки) устройства к работе.

Так, из представленного на рисунке варианта *a* видно, что проточная камера (1) располагается между нижними (2) и верхними (3) фланцами ультразвукового реактора, внутри нее расположен излучатель ультразвуковых колебаний, выполненный в виде стержня переменного сечения (4). Излучатель (4) соединен с источником ультразвуковых колебаний (5). Камера содержит входной патрубок (6) для подачи суспензии сырья (руды) и выходной патрубок (7) для извлечения готового продукта из камеры. Вдоль внутренней поверхности проточной камеры установлена втулка (8). Снизу камеры установлены друг на друга кольца (9) и диск (10) со сквозным отверстием по центру (11) таким образом, что диск (10) зафиксирован между четвертым кольцом снизу и вторым кольцом сверху.

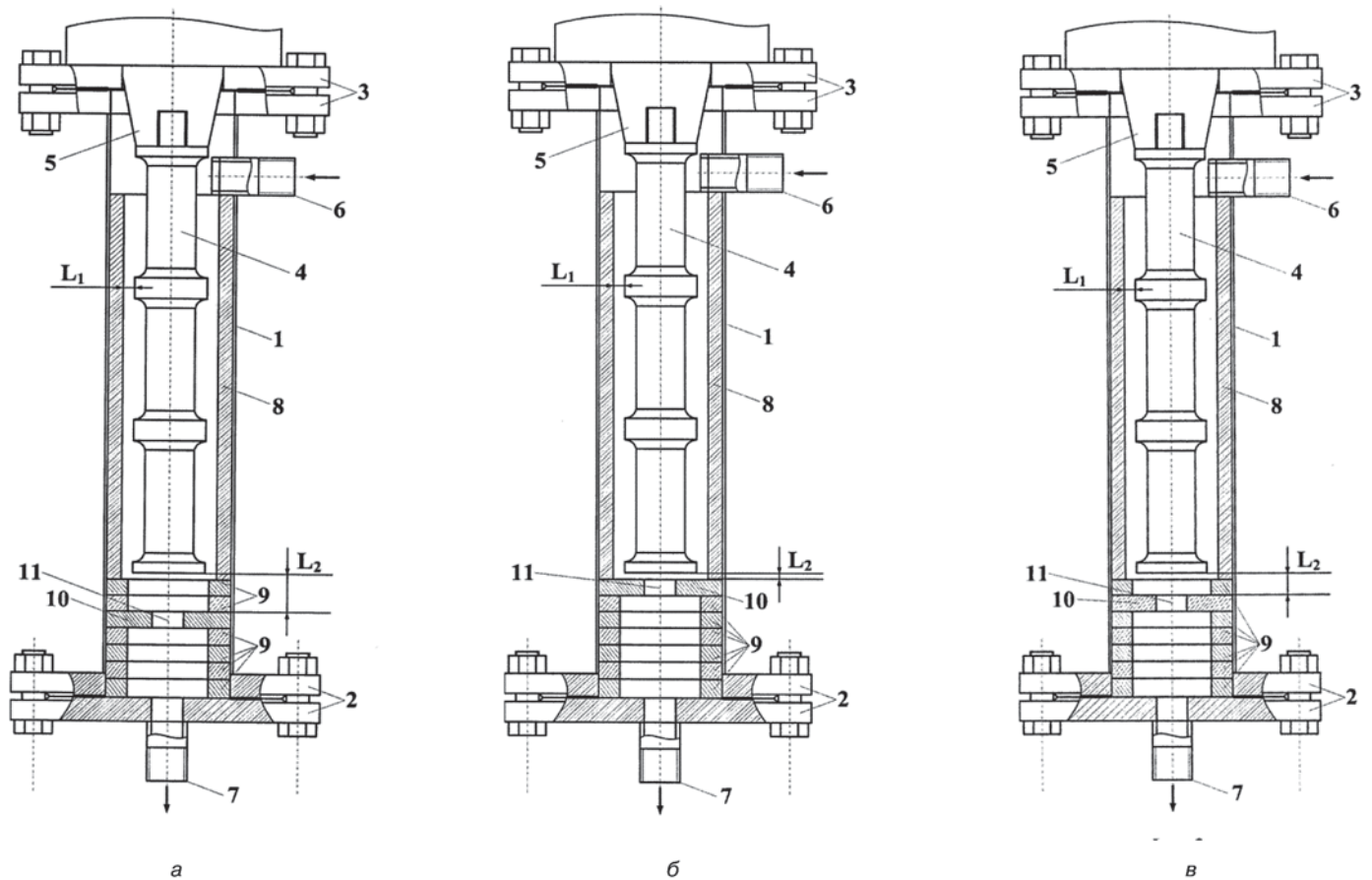


Рисунок. Варианты настройки ультразвукового реактора
[Figure. Variants of tuning of an ultrasonic reactor]

Нижняя часть втулки (8) опирается на верхнее кольцо. Кольца (9) и диск (10) зафиксированы между собой с помощью разъемного соединения «выступ-паз». Диаметр сквозного отверстия (11) диска (10) равен внутреннему диаметру выходного патрубка (7).

Вариант б демонстрирует второй способ настройки устройства, при котором проточная камера (1) ультразвукового реактора содержит втулку (8) и шесть колец (9), установленных друг на друга, поверх которых размещен диск (10) со сквозным отверстием (11). Диаметр сквозного отверстия (11) диска (10) равен внутреннему диаметру выходного патрубка (7). Нижняя часть втулки (8) опирается на диск (10).

По третьему варианту (в) подготовки устройства к работе проточная камера (1) ультразвукового реактора, содержащая втулку (8), установленные друг на друга кольца (9) и диск (10) со сквозным отверстием (11), расположена таким образом, что диск зафиксирован между пятым снизу и первым сверху кольцами (9). Диаметр сквозного отверстия (11)

диска (10) равен внутреннему диаметру выходного патрубка (7). Нижняя часть втулки (8) опирается на верхнее кольцо (9).

При подготовке камеры к работе в ее нижней части на фланец (2) устанавливают одно над другим кольца (9) и диск (10) со сквозным отверстием в центре (11). В камеру вставляется втулка (8), нижняя часть которой опирается на верхнее кольцо (9) (варианты а, в) или диск (10) (вариант б). Кольца и диск содержат на прилегающих плоскостях, ближе к внешнему краю, кольцевые канавки и выступы прямоугольной формы, соответственно за счет которых осуществляется жесткая фиксация колец и диска между собой.

Как правило, общая высота стопы колец с диском должна оставаться постоянной, чтобы не изменять длину втулки, установленной на стопу. Это дешевле и проще, чем изготавливать каждый раз втулку разной длины. При этом положение диска (10) в продольном направлении можно изменять, устанавливая его вместо одного из колец.

Посредством втулки (8), которая может иметь разную толщину, изменяют размеры рабочего пространства для прохождения обрабатываемой суспензии вдоль стержня излучателя (4), а посредством диска (10), который можно переставлять в продольном направлении, изменяют рабочее пространство камеры снизу. При этом во избежание пробоя минимальное расстояние от диска до торца стержня излучателя составляет 5–10 мм.

Процесс осуществляют следующим образом. Для получения суспензии (пульпы) руды в обогреваемую емкость заливают щелочную жидкость, включают механическую мешалку и засыпают в нее синтезируемые компоненты. Подают пульпу через входной патрубок (6) и насосом прокачивают ее в режиме рециркуляции через проточную камеру (1) ультразвукового реактора. В проточной камере (1) компоненты пульпы подвергаются интенсивному ударно-волновому акустическому воздействию с частотой колебаний 18–22 кГц, приводящему к диспергированию, обновлению поверхности и быстрому протеканию массообменных процессов. Ультразвуковая обработка пульпы способствует образованию трещин на твердых частицах, а при последующем соударении частиц к их раскалыванию и сдиранию природных пленок. Это открывает доступ выщелачивающего агента к частицам извлекаемого компонента. По окончании процесса растворения/выщелачивания готовый продукт (раствор или суспензию) откачивают насосом через выходной патрубок (7) в емкость-накопитель или направляют на фильтрацию.

Поскольку появилась возможность регулирования размеров рабочего пространства проточной камеры, экспериментально размеры подбирают таким образом, чтобы при неизменной мощности ультразвукового излучателя интенсивность акустического воздействия на различные виды суспензий возрастала. При этом достигается высокая степень извлечения ценных компонентов в раствор.

2. Результаты экспериментов

Рассмотрим результаты экспериментов по ультразвуковой обработке (выщелачиванию) нескольких видов руд с использованием проточной камеры. В экспериментах была использована проточная камера ультразвукового реактора и втулка, выполненные из труб стандартного диаметра, материал — нержавеющая сталь (либо материал, стойкий к обра-

батываемой суспензии). При этом внутренний диаметр проточной камеры составлял 90 мм, длина — 453 мм, длина стержня излучателя — 318 мм, диаметр — 34–50 мм. Кольца (9) и диск (10) имели толщину 10 мм. Эксперименты проводили подбором оптимального размера рабочего пространства проточной камеры. Опишем каждый из примеров выщелачивания.

Пример 1. Выщелачивание фосфатной редкоземельной руды раствором едкого натра.

В стальной обогреваемый реактор заливают 6 л раствора едкого натра с концентрацией 450 г/л. Раствор нагревают до 110–115 °С. При тщательном перемешивании в раствор подают 2000 г фосфатной редкоземельной руды крупностью менее 0,1 мм, составом (%): P_2O_5 — 22,1; Al_2O_3 — 14,4; сумма редкоземельных оксидов — 19,8. Через входной патрубок (6) в проточную камеру (1) подают суспензию со скоростью 1 л/мин.

Выщелачивание суспензии проводят по 5 мин в режиме с ультразвуковой обработкой материала. Общее время выщелачивания составляет 90 мин. После этого пульпа подается на фильтр. Снятый с него твердый остаток (кек) промывают горячей водой, сушат и отправляют на анализ.

Пример 2. Выщелачивание урана из аргунского концентрата раствором карбоната натрия.

В стальной обогреваемый реактор заливают 6 л раствора карбоната натрия с концентрацией 100 г/л. Раствор нагревают до 70 °С. При тщательном перемешивании в раствор подают 600 г концентрата крупностью менее 0,2 мм, составом (%): U — 0,72; Mo — 0,18; SiO_2 — 40,0; CaO — 24,0; MgO — 11,4; Fe — 2,2; Al_2O_3 — 0,8; S — 0,4; Zn — 0,18; P_2O_5 — 0,07. Через входной патрубок (6) в проточную камеру (1) подают суспензию со скоростью 1 л/мин. Выщелачивание суспензии проводят по 5 мин в режиме с ультразвуковой обработкой материала. Общее время выщелачивания составляет 45 мин. После этого пульпа подается на фильтр. Снятый с него твердый остаток (кек) промывают горячей водой, сушат и отправляют на анализ.

Пример 3. Выщелачивание урана из браннеритового концентрата раствором карбоната натрия.

В стальной обогреваемый реактор заливают 6 л раствора карбоната натрия с концентрацией 50 г/л. Раствор нагревают до 70 °С. При тщательном перемешивании в раствор подают 600 г браннеритового концентрата крупностью менее 0,3 мм, составом (%): U — 0,22; SiO_2 — 57,9; TiO_2 — 1,2; Al_2O_3 — 10,8;

Fe_2O_3 — 3,5; FeO — 1,5; S — 0,4; MnO — 0,12; MgO — 1,8; Na_2O — 1,6; K_2O — 6,6; P_2O_5 — 0,5; CaF_2 — 1,0; $CaCO_3$ — 9,0; S — 3,2. Через входной патрубок (6) в проточную камеру (1) подают суспензию со скоростью 1 л/мин. Выщелачивание суспензии проводят по 10 мин в режиме с ультразвуковой обработкой материала. Общее время выщелачивания составляет 90 мин. После этого пульпа подается на фильтр. Снятый с него твердый остаток (кек) промывают горячей водой, сушат и отправляют на анализ.

По результатам химического анализа оценивали степень извлечения ценных компонентов в раствор. Данные представлены в таблице.

Таблица

Выщелачивание различных концентратов

№	Концентрат	Условия выщелачивания			Извлечение в раствор, %	Степень извлечения в раствор, %	
		t, мин	L ₁ , мм	L ₂ , мм		P ₂ O ₅ /Al ₂ O ₃	U
1	фосфатный	90	15/5	25/5	P ₂ O ₅ /Al ₂ O ₃	3/96	5/98
2	аргунский	45	10/5	5/5	U	4,5	7,5
3	браннеритовый	90	15/10	5/5	U	6,3	8,3

Table

Leaching of various concentrates

№	Concentrate	Leaching conditions			Extraction in solution, %	Degree of extraction in solution, %	
		t, min	L ₁ , mm	L ₂ , mm		P ₂ O ₅ /Al ₂ O ₃	U
1	phosphate	90	15/5	25/5	P ₂ O ₅ /Al ₂ O ₃	3/96	5/98
2	argun	45	10/5	5/5	U	4.5	7.5
3	brannerite	90	15/10	5/5	U	6.3	8.3

3. Обсуждение

Как видно из таблицы, использование ультразвукового воздействия на процесс выщелачивания в проточной камере фосфатного концентрата обеспечивает следующую степень извлечения ценных компонентов в раствор: $P_2O_5 = 93—95\%$; $Al_2O_3 = 96—98\%$. При этом указанную степень извлечения ценных компонентов в раствор обеспечивают размеры рабочего пространства проточной камеры, равные: $L_1 = 5—15$ мм, $L_2 = 5—25$ мм.

При выщелачивании аргунского концентрата в проточной камере с указанными размерами ее рабочего пространства степень извлечения урана в раствор составила $94,5—97,2\%$. При этом установлены оптимальные размеры рабочего пространства

проточной камеры: $L_1 = 5—10$ мм, $L_2 = 5—15$ мм, обеспечивающие наиболее высокие показатели процесса по степени извлечения урана в карбонатный раствор.

Выщелачивание браннеритового концентрата в проточной камере обеспечивает степень извлечения урана в раствор на уровне $96,3—98,3\%$. При этом оптимальные размеры ее рабочего пространства, обеспечивающие максимальный выход урана в карбонатный раствор, составляют $L_1 = 10—15$ мм, $L_2 = 5—15$ мм.

Таким образом, применение проточной камеры ультразвукового реактора для обработки различных составов суспензий позволяет извлекать в раствор от 93 до $98,3\%$ ценных компонентов минерального сырья. Применяемый в работе аппарат защищен патентом (полезная модель) Российской Федерации [22].

Выводы

В ходе исследования предложен и испытан аппарат ультразвуковой проточной обработки рудного сырья (концентрата), содержащего РЗЭ. Установлены оптимальные режимы работы устройства, обеспечивающие его стабильное функционирование при выщелачивании РЗЭ из различных сред.

Экспериментально установлена высокая эффективность использования устройства при выщелачивании различных типов концентратов (фосфатного, аргунского и браннеритового). Показано, что степень извлечения P_2O_5 , Al_2O_3 и урана в раствор при выщелачивании данных концентратов составляет не менее $93,0—98,3\%$.

Список литературы

- [1] Каблов Е.Н., Волкова Е.Ф., Филонова Е.В. Влияние РЗЭ на фазовый состав и свойства нового жаропрочного магниевое сплава системы Mg — Zn — Zr — РЗЭ // *Металловедение и термическая обработка металлов.* 2017. № 7 (745). С. 19—26.
- [2] Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г., Пучков Ю.А. Влияние поверхностно-активных примесей и добавки лантана на структуру и свойства монокристаллического жаропрочного никелевого сплава ЖС36 // *Труды ВИАМ.* 2017. № 4 (52). С. 2. dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-4-2-2
- [3] Тарасов В.П., Кутепов А.В., Хохлова О.В., Рябова А.В. Влияние оксидов Pr и Tb на магнитные параметры магнитотвердых материалов на основе сплава Pr — Ft — В // *Цветные металлы.* 2017. № 2. С. 86—90. doi: 10.17580/tsm.2017.02.14

- [4] Скупов А.А., Пантелеев М.Д., Иода Е.Н., Мовенко Д.А. Эффективность применения редкоземельных металлов для легирования присадочных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 3 (48). С. 14–19. doi: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-14–19
- [5] Грушин И.А., Скворцова С.В., Сперанский К.А., Демаков А.А., Мамонтова Н.А. Влияние дополнительного легирования гадолинием на структуру и свойства опытного жаропрочного титанового сплава в литом и деформированном состояниях // *Титан*. 2017. № 1 (55). С. 16–21.
- [6] Ануфриева С.И., Быховский Л.З., Рогожкин А.А. Минеральное редкоземельное сырье России и возможные технологии его переработки // *Актуальные вопросы добычи, производства и применения редкоземельных элементов в России. РЗМ-2013: материалы Всероссийской конференции по редкоземельным материалам*. Северск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2013. С. 21–22.
- [7] Дьяченко А.Н. Экономические модели развития РЗМ производства на базе комплексных месторождений // *Актуальные вопросы добычи, производства и применения редкоземельных элементов в России. РЗМ-2013: материалы Всероссийской конференции по редкоземельным материалам*. Северск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2013. С. 19–20.
- [8] Мелентьев Г.Б., Тарасов А.В. Перспективы развития промышленности редкоземельных металлов в России // *Цветная металлургия*. 2016. № 1. С. 54–61.
- [9] Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Основа технологического развития России — редкие и редкоземельные металлы // *Новые подходы в химической технологии минерального сырья: тезисы докладов 2-й Российской конференции с международным участием, 3–6 июня 2013 г.* Ч. 1. СПб., 2013. С. 140–143.
- [10] Крюков В.А., Зубкова С.А. Реиндустриализация без своих РЗМ? // *ЭКО*. 2016. Т. 46. № 8. С. 5–24.
- [11] Kuzmin V.I., Pashkov G.L., Lomaev V.G., Voskresenskaya E.N., Kuzmina V.N. Combined approaches for comprehensive processing of rare earth metal ores // *Hydrometallurgy*. 2012. Vols. 129–130. Pp. 1–6.
- [12] Ермолаева В.Н., Михайлова А.В., Когарко Л.Н., Колесов Г.М. Выщелачивание редкоземельных и радиоактивных элементов из щелочных пород Ловозерского массива (Кольский полуостров) // *Геохимия*. 2016. № 7. С. 651–658. doi: 10.7868/S0016752516070049
- [13] Kuryshcheva V.V., Ivanova E.A., Prokhorov P.E. Extractors for rare-earth metals // *Chimica Techno Acta*. 2016. Vol. 3. No. 2. Pp. 97–120. doi: 10.15826/chimtech.2016.3.2.008
- [14] Юрасова О.В., Гасанов А.А., Харламова Т.А., Василенко С.А. Технология извлечения оксида церия (IV) из концентратов редкоземельных металлов с использованием методов электрохимического окисления и экстракции // *Цветные металлы*. 2016. № 3 (879). С. 42–49. doi: 10.17580/tsm.2016.03.07
- [15] Литвинова Т.Е. *Металлургия иттрия и лантаноидов* / Санкт-Петербургский государственный горный университет. СПб., 2012. 272 с.
- [16] Гедгагов Э.И., Тарасов А.В., Гиганов В.Г., Лунькова М.А. Разработка инновационной сорбционно-экстракционной технологии получения высокочистых (99,99 %) соединений редкоземельных металлов при переработке суммарных концентратов (на примере легкой группы) // *Цветные металлы*. 2017. № 8. С. 50–55. doi: 10.17580/tsm.2017.08.07
- [17] Герасимова Л.Г., Николаев А.И., Петров В.Б., Бычяня Ю.Г. Азотнокислородное разложение перовскита в присутствии фторсодержащего реагента // *Цветные металлы*. 2017. № 5. С. 50–53. doi: 10.17580/tsm.2017.05.07
- [18] Nechaev A.V., Sibilev A.S., Smirnov A.V., Shestakov S.V., Polyakov E.G. A rational approach to processing cerium-containing RAW materials // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2016. Vol. 50. No. 5. Pp. 863–866. doi: 10.1134/S0040579516050171
- [19] Патент RU 2403085 С1. Ультразвуковой проточный реактор / Ю.А. Борисов, Г.В. Леонов, В.Н. Хмелев, Д.С. Абраменко, С.С. Хмелев, А.В. Шалунов. 10.11.2010.
- [20] Патент RU 141803 U1. Аппарат ультразвуковой проточной обработки / В.Н. Хмелев, С.В. Левин, С.С. Хмелев, С.Н. Цыганок, Ю.М. Кузовников. 10.06.2014.
- [21] Патент RU 2228217 С1. Способ возбуждения акустических колебаний в текучей среде и устройство (варианты) для его осуществления / В.П. Терехин, Д.М. Пастухов, М.Е. Пастухов. 10.05.2004.
- [22] Патент на полезную модель RU 167656 U1. Проточная камера ультразвукового реактора / А.В. Бояринцев, В.Г. Гиганов, А.В. Гозиян, С.И. Степанов, М.Ю. Малькова, А.Н. Задиранов. 10.01.2017.

Для цитирования:

Малькова М.Ю., Задиранов А.Н. Применение универсального ультразвукового реактора для переработки концентратов руд редкоземельных металлов // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2019. Т. 20. № 1. С. 20–27. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-20-27

Application of the universal ultrasonic reactor in the processing of rare earth metal ores concentrates

Marianna Yu. Malkova*, Aleksandr N. Zadiranov†

Peoples Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation

Article history:

Received: December 16, 2018

Revised: January 25, 2019

Accepted: January 29, 2019

Keywords:

rare earths;
concentrate;
leaching;
ultrasonic reactor;
flowing camera

In recent years, heavy industry has rapidly increased interest in rare earth metals (REE). At the same time, new tasks on completeness of extraction and quality (purity) of REE are set. Providing new requirements for the quality of rare-earth metals can be achieved by two modern methods of ore processing. The first method is traditional leaching, but with the use of modern ultrasonic reactors of a through passage type of domestic production. The second method is leaching with the use of expensive imported impregnated sorbents that require special disposal after the deposition process of the desired fraction of material. The disadvantage of ultrasonic devices for processing of rare-earth metals is that the assigned parameters of the working chamber (length and diameter) are calculated for a specific type of ore being processed. Therefore, ultrasonic reactors operating in the metallurgical industry cannot be used to process all types of REE ores. The aim of the work is to study the efficiency of processing concentrates of ores containing rare earth elements by leaching using a universal ultrasonic reactor suitable for processing various concentrates containing rare earth elements. In this work, alkaline ore processing is carried out in an ultrasonic reactor of a special design, which allows regulation of the dimensions of the reactor working space this makes it possible to configure the reactor for highly efficient ore processing at different initial concentrations of valuable components. As shown by the results of the experiments, the extraction of rareearth metals and other valuable components of the ore in the ultrasonic reactor of this design is not less than 98.3%.

References

- [1] Kablov EN, Volkova EF, Filonova EV. Vliyaniye RZE na fazovyy sostav i svoystva novogo zharoprochnogo magnievogo splava sistemy Mg — Zn — Zr — RZE [Effect of REE on the phase composition and properties of new refractory magnesium alloy of the Mg — Zn — Zr — REE system]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov [Metal Science and Heat Treatment]*. 2017;7(745): 19—26. (In Russ.)
- [2] Kablov DE, Sidorov VV, Min PG, Puchkov YuA. Vliyaniye poverhnostno-aktivnykh primesej i dobavki lantana na strukturu i svoystva monokristallicheskogo zharoprochnogo nikellevogo splava ZHS36 [The influence of surface-active impurities and the addition of lanthanum on the structure and properties of a single-crystal high-temperature nickel alloy ZhS36]. *Trudy VIAM [Proceedings of VIAM]*. 2017;4(52): 2. doi: 10.18577/2307-6046-2017-0-4-2-2 (In Russ.)
- [3] Tarasov VP, Kutepov AV, Khokhlova OV, Ryabova AV. Vliyaniye oksidov Pr i Tb na magnitnye parametry magnitotverdykh materialov na osnove splava Pr — Ft — B [Effect of oxides Pr and Tb on the magnetic parameters of magnetically hard materials based on the Pr — Ft — B alloy]. *Cvetnyye metally [Non-ferrous metals]*. 2017;(2): 86—90. doi: 10.17580/tsm.2017.02.14 (In Russ.)
- [4] Skupov AA, Panteleev MD, Yoda EN, Movenko DA. Effektivnost' primeneniya redkozemel'nykh metallov dlya legirovaniya prisadochnykh materialov [Efficiency of application of rare-earth metals for doping of filler materials]. *Aviacionnyye materialy i tekhnologii [Aviation materials and technologies]*. 2017;3(48): 14—19. doi: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-14-19 (In Russ.)
- [5] Grushin IA, Skvortsova SV, Speransky KA, Demakov AA, Mamontova NA. Vliyaniye dopolnitel'nogo legirovaniya gadolinium na strukturu i svoystva opytного zharoprochnogo titanovogo splava v litom i deformirovannom sostoyaniyah [Influence of gadolinium additional alloying on structure and properties of a pilot heat-resistant titanium alloy in cast and deformed state]. *Titan [Titanium]*. 2017;1(55): 16—21. (In Russ.)
- [6] Anufrieva SI, Bykhovsky LZ, Rogozhkin AA. Mineral'noe redkozemel'noe syr'e Rossii i vozmozhnyye tekhnologii ego pererabotki [Mineral rare-earth raw materials of Russia and possible technologies of its processing]. *Aktual'nye voprosy*

* Professor of Department of Construction, Academy of Engineering, Doctor of Technical Sciences; marianna300@yandex.ru

† Professor of Department of Construction, Academy of Engineering, Doctor of Technical Sciences

- dobychi, proizvodstva i primeneniya redkozemel'nykh elementov v Rossii. RZM-2013: materialy Vserossiiskoi konferentsiya po redkozemel'nykh materialam [Actual problems of mining, production and application of rare earth elements in Russia. RZM-2013: Proceedings of the All-Russian Conference on Rare Earth Materials]*. Seversk: STI NNIU MEPI Publ.; 2013. p. 21–22. (In Russ.)
- [7] Dyachenko AN. Ekonomicheskie modeli razvitiya RZM proizvodstva na baze kompleksnykh mestorozhdenij [Economic models for the development of REM production on the basis of complex deposits]. *Aktual'nye voprosy dobychi, proizvodstva i primeneniya redkozemel'nykh elementov v Rossii. RZM-2013: materialy Vserossiiskoi konferentsiya po redkozemel'nykh materialam [Actual issues of production, production and application of rare earth elements in Russia. RZM-2013: Proceedings of the All-Russian Conference on Rare Earth Materials]*. Seversk: STI NNIU MEPI Publ.; 2013. p. 19–20. (In Russ.)
- [8] Melentiev GB, Tarasov AV. Perspektivy razvitiya promyshlennosti redkozemel'nykh metallov v Rossii [Prospects of development of rare earth metals industry in Russia]. *Cvetnaya metallurgiya [Non-ferrous metallurgy]*. 2016;(1): 54–61. (In Russ.)
- [9] Kablov EN, Ospennikova OG, Vershkov AV. Osnova tekhnologicheskogo razvitiya Rossii — redkie i redkozemel'nye metally [The basis of technological development of Russia — rare and rareearth metals]. *Novye podkhody v khimicheskoi tekhnologii mineral'nogo syr'ya: tezisy dokladov 2-i Rossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, 3–6 iyunya 2013 g. [New approaches in the chemical technology of mineral raw materials: Abstracts of the 2nd Russian Conference with international participation, June 3–6, 2013]*. Part 1. Saint Petersburg; 2013. p. 140–143. (In Russ.)
- [10] Kryukov VA, Zubkova SA. Reindustrializatsiya bez svoih RZM? [Reindustrialization without its REE?]. *ECOjournal*. 2016;46(8): 5–24. (In Russ.)
- [11] Kuzmin VI, Pashkov GL, Lomaev VG, Voskresenskaya EN, Kuzmina VN. Combined approaches for the comprehension of rare earth metal ores. *Hydrometallurgy*. 2012;129–130: 1–6.
- [12] Ermolaeva VN, Mikhailova AV, Kogarko LN, Kolesov GM. Vyshchelachivanie redkozemel'nykh i radioaktivnykh elementov iz shchelochnykh porod Lovozerskogo massiva (Kol'skiy poluostrov) [Leaching of rare-earth and radioactive elements from alkaline rocks of the Lovozero Massif (Kola Peninsula)]. *Geohimiya [Geochemistry]*. 2016;(7): 651–658. doi: 10.7868/S0016752516070049 (In Russ.)
- [13] Kuryшева VV, Ivanova EA, Prokhorov PE. Extractors for rare-earth metals. *Chimica Techno Acta*. 2016;3(2): 97–120. doi: 10.15826/chimtech.2016.3.2.008
- [14] Yurasova OV, Hasanov AA, Kharlamova TA, Vasilenko SA. Tekhnologiya izvlecheniya oksida ceriya (IV) iz koncentratov redkozemel'nykh metallov s ispol'zovaniem metodov elektrohimicheskogo okisleniya i ekstrakcii [Technology for the extraction of cerium (IV) oxide from concentrates of rare earth metals using electrochemical oxidation and extraction methods]. *Cvetnye metally [Non-ferrous metals]*. 2016;3(879): 42–49. doi: 10.17580/tsm.2016.03.07 (In Russ.)
- [15] Litvinova TE. *Metallurgiya itriya i lantanoidov [Metallurgy of yttrium and lanthanides]*. Saint Petersburg State Mining University; 2012. (In Russ.)
- [16] Gedgagov EI, Tarasov AV, Giganov VG, Lunkova MA. Razrabotka innovacionnoj sorbcionno-ekstrakcionnoj tekhnologii polucheniya vysokochistykh (99,99%) soedinenij redkozemel'nykh metallov pri pererabotke summarnykh koncentratov (na primere legkoj gruppy) [Development of innovative sorption-extraction technology for obtaining high-purity (99.99%) compounds of rare earth metals during processing of total concentrates (for example, light group)]. *Cvetnye metally [Non-ferrous metals]*. 2017;(8): 50–55. doi: 10.17580/tsm.2017.08.07 (In Russ.)
- [17] Gerasimova LG, Nikolaev AI, Petrov VB, Bychenya YuG. Azotnokisloe razlozhenie perovskita v prisutstvii ftorsoderzhashchego reagenta [Nitric acid decomposition of perovskite in the presence of a fluorine-containing reagent]. *Cvetnye metally [Non-ferrous metals]*. 2017;(5): 50–53. doi: 10.17580/tsm.2017.05.07 (In Russ.)
- [18] Nechaev AV, Sibilev AS, Smirnov AV, Shestakov SV, Polyakov EG. A rational approach to processing cerium-containing REE materials. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2016;50(5): 863–866. doi:10.1134/S0040579516050171
- [19] Patent RU 2403085 C1. *Ul'trazvukovoj protochnyj reaktor [Ultrasonic flow reactor]*. Borisov YuA, Leonov GV, Khmelev VN, Abramenko DS, Khmelev SS, Shalunov AV. 10.11.2010. (In Russ.)
- [20] Patent RU 141803 U1. *Apparat ul'trazvukovoj protochnoj obrabotki [Apparatus for ultrasonic flow treatment]*. Khmelev VN, Levin SV, Khmelev SS, Tsyganok SN, Kuzovnikov YuM. 10.06.2014. (In Russ.)
- [21] Patent RU 2228217 C1. *Sposob vozbuzhdeniya akusticheskikh kolebanij v tekuchej srede i ustrojstvo (varianty) dlya ego osushchestvleniya [The method of excitation of acoustic oscillations in a fluid medium and the device (variants) for its implementation]*. Terekhin VP, Pastukhov DM, Pastukhov ME. 10.05.2004. (In Russ.)
- [22] Patent for utility model RU 167656U1. *Protochnaya kamera ul'trazvukovogo reaktora [Flow chamber of ultrasonic reactor]*. Boyarintsev AV, Giganov VG, Goziyan AV, Stepanov SI, Malkova MYu, Zadiranov AN. 10.01.2017. (In Russ.)

For citation

Malkova MYu, Zadiranov AN. Application of the universal ultrasonic reactor in the processing of rare earth metal ores concentrates. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(1): 20–27. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-20-27 (In Russ.)



Научная статья

DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-28-36

УДК 622.22:624.1

Повышение эффективности городских подземных сооружений в качестве объектов гражданской обороны

Р.С. Федюк*, П.Г. Козлов†, А.В. Мочалов‡, И.И. Панарин§, Р.А. Тимохин**, Ю.Л. Лисейцев††

Дальневосточный федеральный университет, Российская Федерация, 690091, Владивосток, ул. Суханова, 8

История статьи:

Поступила: 22 октября 2018

Доработана: 15 января 2019

Принята: 30 января 2019

Ключевые слова:

подземные объекты;
защитные сооружения;
вместимость;
площадь;
вентиляция

Стремительное развитие городов, а также растущее число природных и техногенных катастроф делает актуальной задачу размещения части городских сооружений различного назначения под землей, а также проектирование эксплуатации этих объектов в условиях чрезвычайных ситуаций. Статья посвящена исследованию возможности использования городских подземных сооружений в качестве защитных объектов в горных регионах России (на примере Приморского края). Доказано, что для успешного освоения подземного пространства и реализации имеющихся проектов следует разработать соответствующую градостроительную программу, в которой были бы увязаны социально-экономические вопросы с архитектурно-планировочными и инженерно-техническими мероприятиями. Такая программа необходима на стадии инженерного освоения новых территорий или при реконструкции участков старой застройки. Установлены технологические параметры эффективности подземных сооружений двойного назначения. За решающие параметры при проектировании подобного сооружения были приняты вместимость, объем сооружения и необходимый объем воздуха. Выявленные математические зависимости объема подземного сооружения от количества укрываемых людей и необходимой вентиляции от вместимости позволяют интерполировать и экстраполировать, получая необходимые параметры технологической эффективности использования городских подземных сооружений в качестве объектов двойного назначения.

* Доцент Учебного военного центра, к.т.н., доцент; goman44@yandex.ru

† Аспирант кафедры горного дела и комплексного освоения георесурсов; преподаватель, Учебный военный центр

‡ Аспирант кафедры гидротехники, теории зданий и сооружений; начальник учебной части, заместитель начальника, Учебный военный центр

§ Аспирант кафедры горного дела и комплексного освоения георесурсов; начальник военной кафедры факультета военного обучения

** Студент, Учебный военный центр

†† Аспирант кафедры гидротехники, теории зданий и сооружений; преподаватель факультета военного обучения

© Федюк Р.С., Козлов П.Г., Мочалов А.В., Панарин И.И., Тимохин Р.А., Лисейцев Ю.Л., 2019



Введение

Строительное пространство современных городских агломераций характеризуется стремительным развитием: по вертикали вверх — в высоту и вниз — под землю. Рациональное использование подземного пространства дает положительный экологический эффект, освобождая поверхность земли для человека, лесных и парковых насаждений.

Причинами освоения подземного пространства можно считать:

- недостаток свободных городских земель для нового строительства;
- необходимость реконструкции (развития) транспортной системы, разведение транспортного и пешеходного движения на разных уровнях;
- развитие системы обслуживания;
- увеличение количества транспортных средств и потребность в площадях для их хранения;
- развитие инженерного оборудования города;
- развитие строительных технологий.

Освоение городом подземных пространств ведет к более интенсивному и эффективному использованию территории, оптимизации транспортно-коммуникационной сети и, как следствие, сокращению временных затрат населения на передвижение. Масштабы подземного строительства постоянно увеличиваются. В первую очередь под землей размещают сооружения инженерно-транспортной инфраструктуры — транспортные линии и автомагистрали, парковки, транспортно-пересадочные узлы и др. [1].

Заслуживают внимание прогрессивные направления освоения подземного пространства, активно развиваемые во многих странах. Например, подземные железные дороги, скоростные подземные трамваи и метрополитены позволяют уменьшить последствия перенаселенности больших городов, высвободить площади для жилой застройки на поверхности земли и пропустить большие потоки людей. Глубокие подземные тоннели инженерных систем больших городов позволяют использовать их для многоцелевого назначения (канализации водопровода, транспорта, сброса ливневых вод и др.) и на этой основе обеспечить современную систему жизнеобеспечения при освоении подземного городского пространства [2].

Помимо этого, в современном мире, насыщенном природными и техногенными опасностями, имеется необходимость предусматривания инженерной защиты населения в гражданских подзем-

ных сооружениях. Объекты двойного назначения — это инженерные сооружения производственного, общественного, коммунально-бытового или транспортного назначения, приспособленные для укрытия людей, техники и имущества от опасностей, возникающих в результате последствий аварий на потенциально опасных объектах, а также воздействия современных средств поражения.

В связи с этим актуальным является формирование подходов и методов регулирования рационального использования городского подземного пространства для размещения гражданских сооружений двойного назначения.

Целью работы является определение технологической эффективности использования подземных сооружений в качестве объектов двойного назначения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проклассифицировать подземные пространства;
- определить целесообразность использования подземных пространств для объектов двойного назначения;
- систематизировать подземные сооружения, пригодные для инженерной защиты населения;
- выявить условия размещения объектов двойного назначения в зависимости от горно-геологических и горно-технологических факторов;
- определить границы параметров технологической эффективности использования подземных сооружений двойного назначения.

1. Виды подземных сооружений

В данной статье затрагиваются только городские подземные сооружения, которые классифицируются по назначению и характеру использования:

- инженерно-транспортные сооружения (метро, транспортно-пересадочные узлы, стоянки, тоннели, пешеходные переходы и т.п.);
- предприятия торговли и общественного питания;
- зрелищные, административные, спортивные сооружения (выставочные залы, конференц-залы, кинотеатры, тренажерные и спортивные залы, бильярдные и т.п.);
- объекты коммунально-бытового обслуживания (ателье, прачечные, химчистки, парикмахерские, ремонтные мастерские);

- объекты складского хозяйства (разгрузочные дебаркадеры, складские помещения, холодильные камеры и т.п.);
- объекты промышленного назначения и энергетики (лаборатории, цеха, котельные и т.п.);
- инженерное оборудование (трубопроводы, кабели, коллекторы и т.п.) [3].

Также существуют классификации по длительности пребывания человека, объемно-планировочной схеме, условиям расположения в городе, условиям залегания и др. Соответственно, в сооружениях двойного назначения необходимо предусматривать длительность пребывания укрываемых, объемно-планировочные схемы, оптимально обеспечивающие защиту, расположение в местах максимального проживания людей и т.д. [4].

Современными градостроительными концепциями предполагается распределение всех городских подземных сооружений по четырем уровням глубины:

- первый уровень (расположенный на максимальной глубине): коммуникации, эксплуатируемые без постоянного присутствия человека;
- второй уровень: предприятия промышленности и энергетики с постоянным присутствием ограниченного количества квалифицированного персонала;
- третий уровень: транспортные тоннели, гаражи и автостоянки, подсобно-складские помещения, разгрузочные дворы, служебные коммуникации и другие сооружения, кратковременно используемые неограниченным количеством людей;
- четвертый уровень (приповерхностный): пешеходные зоны и тяготеющие к ним учреждения, магазины, культурно-досуговые центры и прочие предприятия торгово-бытового обслуживания населения, постоянно эксплуатируемые и посещаемые неограниченным количеством людей.

Для успешного освоения подземного пространства и реализации имеющихся проектов следует разработать соответствующую градостроительную программу, в которой были бы увязаны социально-экономические вопросы с архитектурно-планировочными и инженерно-техническими мероприятиями. Такая программа необходима на стадии инженерного освоения новых территорий или при реконструкции участков старой застройки. Учитывая поставленную в исследовании цель, необходимо определить целесообразность использования каждого конкретного подземного объекта в военное время или во время чрезвычайной ситуации.

2. Параметры целесообразности использования подземных пространств для объектов двойного назначения

Подземные объекты следует активно использовать для нужд инженерной защиты населения. Их строительство необходимо предусматривать в районах новостроек, а уже существующие объекты приводить в соответствие с действующими требованиями защиты населения в чрезвычайной ситуации техногенного характера.

Для использования в качестве убежищ могут (и должны) применяться метрополитены, тоннели и другие городские подземные сооружения. По результатам отбора подземных объектов для использования в качестве защитных сооружений производится их постановка на учет в соответствующем субъекте РФ, определение и документирование их характеристик [4]. В итоге составляются подробные описи объектов с топографическими картами (планами) их местоположения.

Согласно действующим нормам, разработанным в 1970—1980-х годах, все защитные сооружения считаются абсолютно пригодными в качестве убежищ от различных видов оружия. Однако В.Г. Нарышкин и В.И. Пчелкин [5], учитывая современные средства поражения, предложили ввести дополнительный класс сооружений — «ограниченно пригодные». Класс «непригодные» присваивается убежищам, имеющим недостаточные габаритные размеры; расположенным в горных породах, склонных к самовозгоранию; находящимся в зонах возможного затопления паводковыми водами; оказавшимся в сильно обводненных, неустойчивых, закарстованных горных породах с интенсивными оползновыми явлениями; пересекающих участки с большими тектоническими нарушениями.

Например, при строительстве штольни Бункерная на руднике 2-й Советский в г. Дальнегорске было оборудовано убежище (рис. 1) вместимостью 400—600 чел. с целью его последующего использования при возникновении чрезвычайной ситуации природного или техногенного характеров. Данная схема является типовой для рудников, но убежище оборудуется лишь при нахождении рудника в пределах городской территории. Большинство рудников находятся на удалении более 1 км от города, поэтому защитные сооружения там не оборудуются.

В условиях расположения городов (например, Владивостока) на пересеченной местности, изоби-

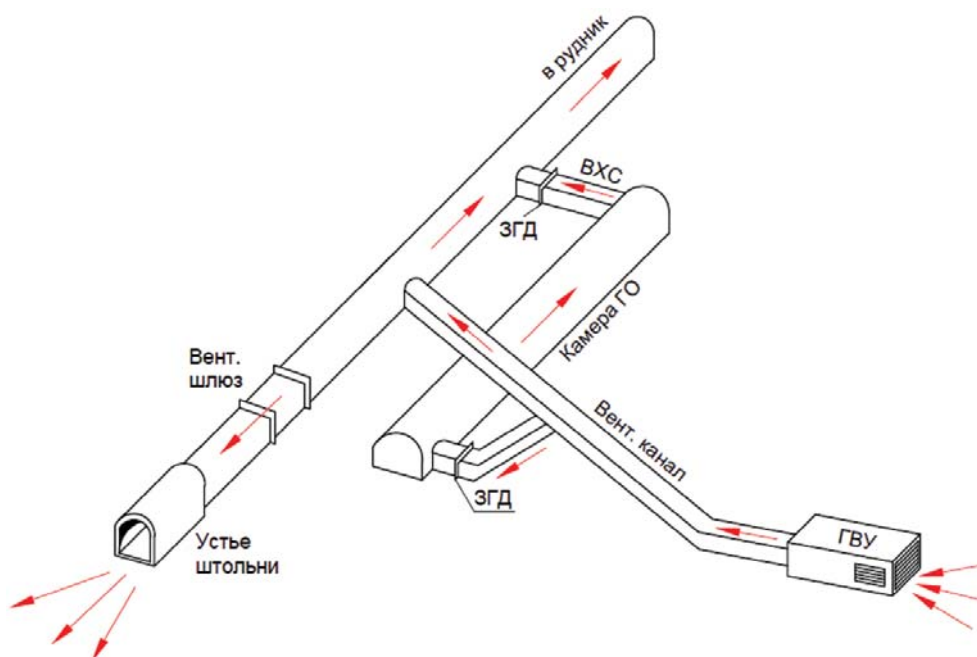


Рис. 1. Типовая схема оборудования защитного сооружения на руднике
[Figure 1. Typical equipment layout of the protective structure at the mine]

люющей холмами (возвышенностями) и оврагами, становится целесообразным размещение различных объектов в горных выработках (штольнях, тоннелях, камерных выработках и т.п.). Одним из приоритетных видов подземных сооружений будут парковки и гаражи для автомобильного и мотоциклетного транспорта, ведь в крупных городах и агломерациях очень сложно найти подходящую площадку для размещения и временного хранения техники на поверхности земли, а поместить ее в выработках и штольнях очень удобно.

При освоении подземного пространства в промышленных и хозяйственных целях целесообразным является использование существующей транспортной системы горного предприятия. От транспортных выработок строятся ответвления к местам размещения подземных объектов, проводятся обособленные вентиляционные и вспомогательные выработки для обеспечения запасных выходов [6].

При анализе технологической эффективности использования подземного сооружения необходимо проводить оценку по различным параметрам: от стоимости земли над сооружением до психологического состояния размещенных в этом сооружении людей. Однако, как уже было отмечено ранее, практически все подземные сооружения являются объектами двойного назначения. Поэтому вопрос стоимости земли, да и в целом затраты на строи-

тельство, находятся в подчиненном положении от вопросов вместимости и безопасности.

При строительстве и эксплуатации подземных сооружений в качестве объектов двойного назначения необходимо учитывать:

- природные условия и рельеф местности;
- горно-геологические и горно-технологические факторы;
- требования, определяющие порядок вскрытия и разработки горного тела (последовательность, способ и порядок возведения сооружения);
- негативное воздействие горных работ на окружающую среду.

Устойчивость, долговечность и надежность эксплуатации сооружений подземной городской инфраструктуры в значительной мере зависят от наличия технических характеристик конструктивных элементов этих сооружений. Ввиду ответственного назначения выработок и большого срока их службы особое значение будет иметь правильный выбор их формы, размеров и способов крепления. К примеру, штольни имеют сводообразное, трапециевидное или прямоугольное сечение и проводятся с уклоном 0,001—0,008 в сторону устья.

Форма и размеры поперечного сечения подземного сооружения должны обеспечивать необходимую технологическую возможность размещения в ней применяемого оборудования и инженерных

коммуникаций, а также соблюдение необходимых требований техники безопасности при транспортировке оборудования и материалов, вентиляции и водоотливе. При расчете проектного сечения выработки в проходке кроме толщины крепи необходимо учитывать горно-геологические характеристики вмещающих пород. Форма поперечного сечения выработки выбирается в зависимости от устойчивости пород, срока службы и назначения выработки. При гористом рельефе предпочтительнее использование горизонтальных выработок. Для них, как правило, принимается сводчатая форма поперечного сечения с вертикальными боковыми стенками [7].

Кроме того, на эффективность сооружения влияют различные технологические параметры: материалы несущих конструкций, влияние вибрации, взаимосвязь с существующими объектами, объем камерных выработок, производительность системы вентиляции, безопасность, габариты сооружения (полезная площадь, этажность), стоимость земли, сейсмостойкость и др. [8; 9].

Таким образом, выявлен спектр параметров технологической эффективности использования подземных защитных сооружений. Очевидно, что для защитных сооружений гражданской обороны (да и для подземных сооружений двойного назначения) основными параметрами являются вместимость, объем камерной выработки и необходимая вентиляция.

3. Эффективный объем сооружения

При комплексном освоении подземных камер большое значение имеет коэффициент полноты использования подземного пространства:

$$K_{\text{пп}} = V_{\text{пс}}/V_0,$$

где $V_{\text{пс}}$ — объем подземного сооружения; V_0 — общий объем пригодного для строительства подземного пространства.

Увеличение $K_{\text{пп}}$ при неизменных значениях V_0 имеет большое экономическое значение, поскольку происходит за счет вовлечения в хозяйственный оборот дополнительных объемов подземного пространства. Определение рациональных параметров подземных сооружений должно производиться с учетом их взаимного влияния и способов поддержания выработанного пространства. Полнота использования подземного пространства не должна зависеть от того, в каких зонах по безопасности предполагается строительство тех или иных сооружений [5].

Радиус сбора населения составляет 500—1000 м (эффективно до 800 м).

По вместимости убежища делятся на: малые (150—400 чел.), средние (400—600 чел.) и большие (600—1500 чел.).

График зависимости объема подземного сооружения от количества укрываемых людей (построен по нормам [10]) приведен на рис. 2.

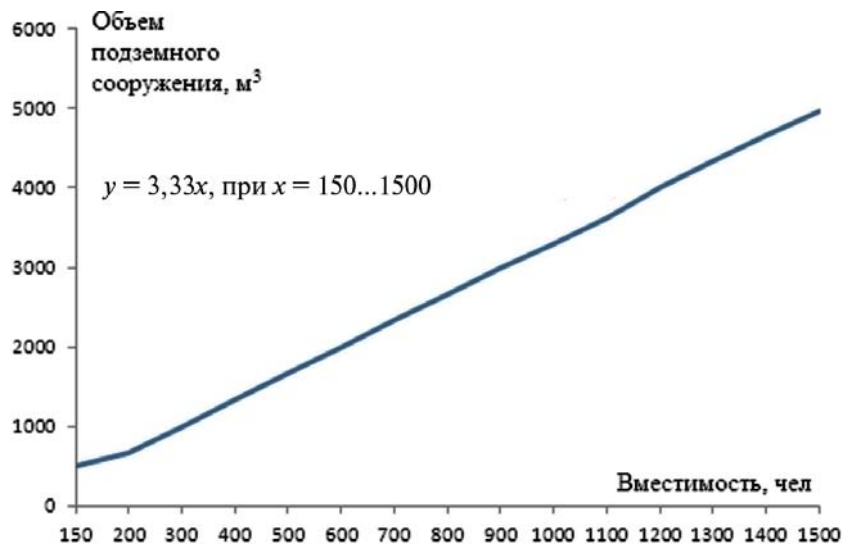


Рис. 2. Зависимость объема подземного сооружения от количества укрываемых людей
[Figure 2. The dependence of the volume of underground structures from the number of people to be sheltered]

Построена практически линейная зависимость, интерполируя которую можно находить технологически эффективные параметры вместимости подземного сооружения двойного назначения и его объем.

Таким образом, выявлено, что экономически эффективные объемы камерных выработок находятся в диапазоне от 500 м³ (150 чел.) до 5000 м³ (1500 чел.). Это удовлетворяет нормативным значениям [10], в которых указано, что внутренний объем помещения должен быть не менее 1,5 м³ на одного укрываемого. Кроме того, учтены и вспомогательные помещения (выработки вспомогательного назначения), которые достигают 35–37 % от общего объема подземных сооружений. Капитальные затраты на проведение и оснащение этих выработок, их обслуживание в период эксплуатации подземного сооружения оказывают доминирующее влияние на технологическую эффективность его работы и конкурентоспособность.

4. Расчет параметров проветривания

Воздухоснабжение горных выработок и пещер, используемых в качестве защитных сооружений, должно обеспечивать непрерывное пребывание в них укрываемых из расчета не менее двух суток [4].

Проветривание подземного пространства является одним из основных технологических процессов, обеспечивающих безопасные условия эксплуатации подземных сооружений. При строительстве подземных сооружений промышленного и социально-культурного назначения организация принуди-

тельного проветривания является обязательной. Для некоторых видов подземных сооружений считается, что для проветривания достаточно воздуха, движение которого в выработках возбуждается при ведении в них технологических операций [11].

Естественная тяга является природным фактором, оказывающим существенное влияние на условия проветривания подземного сооружения. Величина естественной тяги и ее доля в полном статическом напоре главной вентиляционной установки во многом определяются разницей высотных отметок устьев воздухоподающих и воздуховыдающих выработок в условиях горной местности и различной плотностью воздуха на этих отметках [11].

Одним из основных потребителей воздуха является человек. Расчет количества воздуха, необходимого для дыхания людей, занятых одновременно на подземных работах, в соответствии с Правилами безопасности при строительстве подземных сооружений производится по формуле:

$$Q_{\text{л}} = qN,$$

где q — количество воздуха, которое необходимо подать к рабочему месту человека, м³/мин (в соответствии с Правилами безопасности при строительстве подземных сооружений [12], $q = 6$ м³/мин); N — наибольшее число людей, занятых одновременно на подземных работах.

При строительстве подземных сооружений конструктивные параметры транспортных выработок подземного объекта устанавливают на основе про-

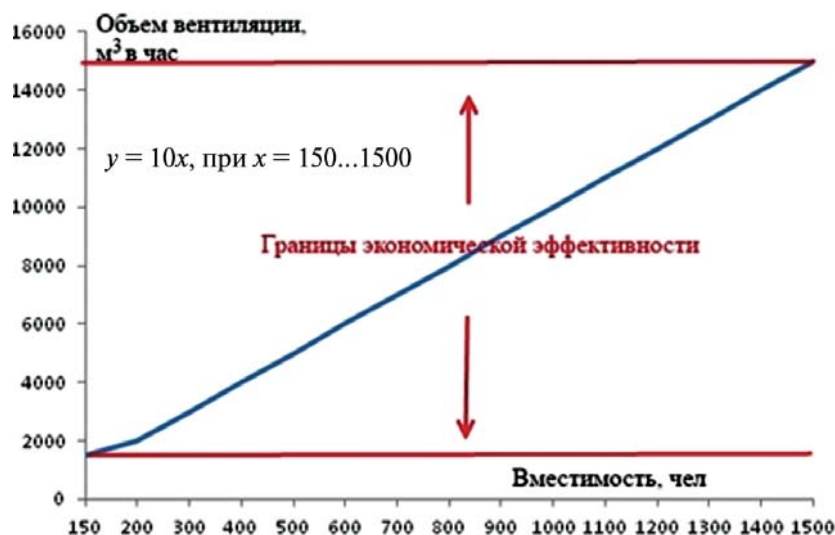


Рис. 3. Зависимость объема необходимой вентиляции от вместимости
[Figure 3. Dependence of the volume of necessary ventilation on the number people to be sheltered]

ектируемых видов и типоразмеров транспортных средств и величин грузопотоков по подземным выработкам с учетом соблюдения условий проветривания этих выработок и технологических камер. Обеспечение 4-кратного обмена воздуха в течении часа для подземного объекта объемом более 50 тыс. м³ соответствует условиям проветривания горных предприятий с годовой производительностью 150—200 тыс. т. При этом, согласно СНиП 32-04-97, скорость движения воздушного потока в выработках, в которых находятся люди, не должна превышать 6 м/с. Этот фактор имеет доминирующее значение при обосновании сечения воздухоподающих транспортных выработок [3; 13].

Для защитных сооружений вентиляцию необходимо рассчитывать из расчета 8—13 м³ на человека в час в зависимости от климатической зоны [10]. Например, Приморский край относится ко 2 зоне — 10 м³ на человека в час.

Зависимость объема необходимой вентиляции от вместимости представлена на рис. 3.

Заключение

По итогам исследования выявлены технологические параметры подземных сооружений двойного назначения. За решающие параметры при проектировании такого сооружения были приняты вместимость, объем сооружения и необходимый объем воздуха. Установлены следующие эффективные границы данных параметров:

- вместимость — 150—1500 человек;
- объем сооружения — 500—5000 м³;
- воздухообмен — 1500—15000 м³/ч.

Полученные математические зависимости объема подземного сооружения от количества укрываемых людей и необходимой вентиляции от вместимости позволяют интерполировать и экстраполировать, получая необходимые параметры технологической эффективности использования городских подземных сооружений в качестве объектов двойного назначения.

Список литературы

- [1] Макаров В.В., Хрулев Е.А., Хрулев Ю.А. Эффективность использования подземного пространства мегаполисов // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2016. № 1. С. 143—146.

- [2] Прохоров Н.И., Моисеев В.А. Использование подземного пространства в инженерно-геологических условиях г. Тулы // Известия ТулГУ. Науки о земле. 2014. Вып. 1. С. 61—64.
- [3] Макишин В.Н., Фаткулин А.А. Условия формирования и перспективы развития подземного пространства городов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. № 3. С. 220—225.
- [4] Котляревский В.А., Ганушкин В.И., Костин А.А. и др. Убежища гражданской обороны: конструкция и расчет. М.: Стройиздат, 1989. 606 с.
- [5] Нарышкин В.Г., Пчелкин В.И. Проблема отбора горных выработок и пещер для их использования в качестве защитных сооружений на особый период // Технологии гражданской безопасности. 2013. Т. 10. № 2 (36). С. 56—60.
- [6] Макишин В.Н., Фаткулин А.А., Лесовский Б.Ф. Методология обоснования рациональных параметров транспортных выработок подземных сооружений: монография. Владивосток: Изд-во ДВГТУ. 2008. 112 с.
- [7] Орлов А.О., Смирнов Ю.Г. Оценка конструктивно-компоновочных решений подземных комплексов для атомных станций малой мощности в арктических регионах России // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 4. С. 29—34.
- [8] Liao R. Overview of Anti-Seismic Researches of Underground Structures // E3S Web of Conferences 38. 2018. 03038.
- [9] Ranjbar N., Mehrli M., Maheri M.R., Mehrli M. Hot-pressed geopolymer // Cement and Concrete Research. 2017. No. 100. Pp. 14—22.
- [10] СП 88.13330.2014. Защитные сооружения гражданской обороны. 2014. 46 с.
- [11] Макишин В.Н., Куделина М.В., Хрулев Е.А., Хрулев Ю.А. Особенности освоения подземного пространства городов в условиях гористой местности // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2014. № 3/4. С. 187—210.
- [12] ПБ 03-428-02. Правила безопасности при строительстве подземных сооружений. М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2009. 75 с.
- [13] Батаршин В.О., Козлов П.Г., Федюк Р.С. Особенности развития горнодобывающей промышленности Приморского края // Приоритетные направления развития экономики Дальнего Востока: материалы региональной (с международным участием) научно-практической конференции. 2017. С. 165—169.

Для цитирования:

Федюк Р.С., Козлов П.Г., Мочалов А.В., Панарин И.И., Тимохин Р.А., Лисейцев Ю.Л. Повышение эффективности городских подземных сооружений в качестве объектов гражданской обороны // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 1. С. 28—36. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-28-36

Improving the efficiency of urban underground structures as objects of civil defense

Roman S. Fediuk*, Pavel G. Kozlov†, Aleksandr V. Mochalov‡,
Igor I. Panarin§, Roman A. Timokhin**, Yuriy L. Liseitsev‡‡

Far Eastern Federal University, 8 Sukhanova St., Vladivostok, 690091, Russian Federation

Article history:

Received: October 22, 2018

Revised: January 15, 2019

Accepted: January 30, 2019

Keywords:

underground objects;
protective structures;
capacity;
area;
ventilation

The rapid development of cities, as well as the growing number of natural and man-made disasters, makes it important to place part of various urban buildings underground, as well as design the operation of these facilities in emergency situations. The article is devoted to the study of the possibility of using urban underground structures as protective objects in the mountainous regions of Russia (using the example of Primorsky Krai). It was proved that for successful development of underground space and implementation of existing projects, an appropriate urban planning program should be developed, which would link socio-economic issues with architectural planning and engineering and technical measures, and such a program is necessary at the stage of engineering development of new territories or during reconstruction plots of old buildings. The technological parameters of the efficiency of dual-purpose underground structures are revealed. Capacity, volume of the structure and the required volume of air were taken as decisive parameters in the design of such a structure. The obtained mathematical dependences of the volume of the underground structure on the number of people being sheltered and the necessary ventilation on the capacity allow to interpolate and extrapolate, obtaining the necessary parameters of the technological efficiency of using urban underground structures as dual-use objects.

References

- [1] Makarov VV, Khrulev EA, Khrulev YuA. Effektivnost' ispol'zovaniya podzemnogo prostranstva megapolisov [Efficiency of use of underground space of megacities]. *Vestnik inzhenernoy shkoly DVFU [Bulletin of the School of Engineering FEFU]*. 2016;(1): 143–146. (In Russ.)
- [2] Prokhorov NI, Moiseev VA. Ispol'zovaniye podzemnogo prostranstva v inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh g. Tuly [The use of underground space in the engineering-geological conditions of the Tula city]. *Izvestiya TulGU. Nauki o zemle [News of the TSU. Earth Sciences]*. 2014;(1): 61–64. (In Russ.)
- [3] Makishin VN, Fatkulin AA. Usloviya formirovaniya i perspektivy razvitiya podzemnogo prostranstva gorodov [Conditions of formation and development prospects of the underground space of cities]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy [Gorny informative and analytical bulletin]*. 2010;(3): 220–225. (In Russ.)
- [4] Kotlyarevsky VA, Ganushkin VI, Kostin AA et al. *Ubezhitel'naya grazhdanskoy oborony: konstruktsiya i raschet [Shelters of civil defense: design and calculation]*. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1989. (In Russ.)
- [5] Naryshkin VG, Pchelkin VI. Problema otbora gornykh vyrabotok i peshcher dlya ikh ispol'zovaniya v kachestve zashchitnykh sooruzheniy na osoby period [The problem of selection of mine workings and caves for their use as protective structures for a special period]. *Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti [Civil Security Technologies]*. 2013;10(2(36)): 56–60. (In Russ.)
- [6] Makishin VN, Fatkulin AA, Lesovsky BF. *Metodologiya obosnovaniya ratsional'nykh parametrov transportnykh vyrabotok podzemnykh sooruzheniy [Methodology of substantiation of rational parameters of the transport workings]*

* Assistant Professor of Military Training Center, PhD; roman44@yandex.ru

† PhD student of Department of Mining and Integrated Development of Georesources; lecturer of Military Training Center

‡ PhD student of Department of Hydraulic Engineering, Theory of Buildings and Structures; lecturer of Military Training Center

§ PhD student of Department of Mining and Integrated Development of Georesources; Head of the Military Department, Faculty of Military Training

** Student, Military Training Center

‡‡ PhD student of Department of Hydraulic Engineering, Theory of Buildings and Structures; lecturer of Military Training Center

- of underground structures]. Vladivostok: DVG TU Publ.; 2008. (In Russ.)
- [7] Orlov AO, Smirnov YuG. Otsenka konstruktivno-komponovochnykh resheniy podzemnykh kompleksov dlya atomnykh stantsiy maloy moshchnosti v arkticheskikh regionakh Rossii [Assessment of design and layout solutions of underground complexes for low-power nuclear power plants in the arctic regions of Russia]. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal [News of Universities. Mining Journal]*. 2018;(4): 29—34. (In Russ.)
- [8] Liao R. Overview of Anti-Seismic Researches of Underground Structures. *E3S Web of Conferences*. 2018;(38): 03038.
- [9] Ranjbar N, Mehrali M, Maheri MR, Mehrali M. Hot-pressed geopolymer. *Cement and Concrete Research*. 2017;(100): 14—22.
- [10] SP 88.13330.2014. *Zashchitnyye sooruzheniya grazhdanskoy oborony [The protective shelters of civil defense]*. 2014.
- [11] Makishin VN, Kudelina MV, Khrulev EA, Khrulev YuA. Osobennosti osvoyeniya podzemnogo prostranstva gorodov v usloviyakh goristoy mestnosti [Features of the development of the underground space of cities in conditions of mountainous terrain]. *Vestnik inzhenernoy shkoly DVFU [Bulletin of the School of Engineering FEFU]*. 2014;(3/4): 187—210. (In Russ.)
- [12] PB 03-428-02. *Pravila bezopasnosti pri stroitel'stve podzemnykh sooruzheniy [Safety rules for the construction of underground structures]*. Moscow: NTTS “Proiyshlennaya bezopasnost” Publ.; 2009. (In Russ.)
- [13] Batarshin VO, Kozlov PG, Fediuk RS. Osobennosti razvitiya gornodobyvayushchey promyshlennosti Primorskogo kraya [Features of the mining industry of Primorsky Krai]. *Prioritetnyye napravleniya razvitiya ekonomiki Dal'nego Vostoka: materialy regional'noy (s mezhdunarodnym uchastiyem) nauchno-prakticheskoy konferentsii [Priority directions of development of the economy of the Far East: materials of the regional (with international participation) scientific-practical conference]*. 2017: 165—169. (In Russ.)

For citation:

Fediuk RS, Kozlov PG, Mochalov AV, Panarin II, Timokhin RA, Liseitsev YuL. Improving the efficiency of urban underground structures as objects of civil defense. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(1): 28—36. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-28-36 (In Russ.)



DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-37-47

УДК 552.08

Верхнемеловые риолитовые пеплы Деревянных Гор (остров Новая Сибирь, Новосибирские острова)

В.В. Костылева*, Е.В. Щепетова†, А.Е. Котельников‡

*† Геологический институт РАН, Российская Федерация, 110017, Москва, Пыжевский пер., 7

‡ Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

История статьи:

Поступила: 16 ноября 2018

Доработана: 22 февраля 2019

Принята: 28 февраля 2019

Ключевые слова:

Северо-Восточная Арктика;

Новосибирские острова;

верхний мел;

риолитовый вулканизм

Статья посвящена первым находкам риолитовых пеплов в верхнемеловых отложениях о. Новая Сибирь. В ходе полевых работ 2016 г. в районе мыса Утес Деревянных Гор было выявлено четыре слоя тонкозернистых нелигитифицированных пеплов в составе турон-коньякской угленосной деревянногорской свиты. В статье представлены результаты петрографического, рентген-дифрактометрического и микронзондового анализа пирокластики из пепловых слоев. Предложена типизация вулканогенно-терригенных отложений. Образцы исследованы в прозрачных шлифах при помощи поляризационного микроскопа. Рентгенофазовый анализ глинистой фракции проводился с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3. Микрорентгеноспектральные химические анализы витрокластов выполнены на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM-6480LV с микроанализатором Oxford Instruments INCA-Energy 350. Установлено, что деревянногорская свита сложена риолитовыми туффитами, среди которых залегают тонкозернистые кристалло-витрокластические и витрокластические пеплы низко- и нормальнощелочных высококальциевых риолитов мощностью до 2,5 м. Отложения с низким содержанием пирокластики распространены незначительно. Новые данные о строении и составе деревянногорской свиты подтверждают гипотезу предыдущих исследователей о том, что осадконакопление в районе о. Новая Сибирь в позднем мелу сопровождалось эксплозивным кислым вулканизмом. Основной

Благодарности. Работа выполнена в рамках тем госзадания № 0135-2018-0034 (ВК), № 0135-2016-0004 (ЕЩ) Геологического института РАН. Полевые и аналитические работы финансировались по договору с ООО «РН-Шельф-Арктика» № 2100016/0276Д (о. Новая Сибирь).

* Старший научный сотрудник лаборатории сравнительного анализа осадочных бассейнов, к.г.-м.н.; kovikto@yandex.ru

† Старший научный сотрудник лаборатории седиментологии и геохимии осадочных бассейнов, к.г.-м.н.

‡ Доцент, департамент недропользования и нефтегазового дела, к.г.-м.н., доцент

© Костылева В.В., Щепетова Е.В., Котельников А.Е., 2019



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

целью статьи является обсуждение источников пирокластического материала на территории Новосибирских островов в турон-коньякское время. Сделан вывод о территориальной близости палеовулканического центра извержений к области осадконакопления. Предположено, что палеовулканические центры находились в пределах современной территории островов Котельный, Земля Бунге, Фаддеевский и, вероятно, были унаследованы с раннеальбского времени.

Введение

На Новосибирских островах верхнемеловые отложения известны только в пределах архипелага Анжу. По результатам среднемасштабной геологической съемки (1974—1977 гг.) в их составе выделены бунгинская (K_2bn) и деревянногорская свиты (K_2dr), сложенные вулканогенно-терригенными угленосными отложениями общей мощностью около 280 м [1—3]. Бунгинская свита распространена на Земле Бунге, о. Фаддеевский в заливе Геденштрома, и проливе Санникова, где не имеет естественных выходов на дневную поверхность [1; 2]. По данным картировочного бурения свита залегает с перерывом на коре выветривания риолитов нижнего альба, венчающих угленосную балыктахскую свиту апт-альбского возраста [2]. Деревянногорская свита вскрыта картировочной скважиной № 46 и имеет естественные выходы в береговых обрывах на юго-западном побережье о. Новая Сибирь, в районе мыса Утес Деревянных Гор, где согласно, без видимого перерыва залегает на верхней части бунгинской свиты (рис. 1). Деревянногорская свита также закартирована в верховьях правого притока р. Большая [2]. На о. Новая Сибирь верхнемеловые породы перекрыты среднееоценовыми осадками и интенсивно дислоцированы [4].

Деревянные Горы, начиная с экспедиций М. Геденштрома (1809 г.), П. Анжу (1820 г.), Э. Толля (1886 г.), привлекали внимание исследователей благодаря уникальному местонахождению ископаемой флоры, по которой уже в середине XX века и был установлен верхнемеловой возраст вмещающих толщ, уточненный М.Н. Бондаренко по результатам палинологического анализа до турон-коньяка [5—7]. Значительное внимание геологов также было уделено строению верхнемелового разреза. О.А. Иванов и Д.С. Яшин пликативные и дизъюнктивные нарушения дочетвертичных отложений в районе Деревянных Гор связывали с альпийским циклом орогенеза [8]. М.К. Косыко и Г.В. Труфанов описали складчато-надвиговые деформации, обусловленные, по их мнению, геодинамической активизацией в Северо-Восточной Арктике в олигоцен-миоцене [3]. Позднее была выдвинута гипоте-

за о гляциодинамической природе дислокаций [4; 9; 10]. Однако детальное литолого-петрографическое изучение верхнемеловых отложений деревянногорской свиты и исследование их вещественного состава с применением комплекса современных методов не проводились. До настоящего времени эти породы не были типизированы, а условия их образования подробно не обсуждались. В публикациях упоминается о присутствии в разрезе туфогенных пород с высоким содержанием кислого вулканического стекла, на основании чего выдвигаются предположения об интенсивной вулканической деятельности на окружающей территории и продолжении до середины позднего мела посторогенного внутриплитного магматизма, начальная фаза которого на Новосибирских островах относится к первой половине альба [1; 2; 6; 8; 11].

В 2016—2017 гг. в рамках проекта ПАО «НК «Роснефть»» Геологическим институтом РАН на о. Новая Сибирь были проведены полевые работы с последующей лабораторно-аналитической обработкой полученного геологического материала. В результате детальных исследований было установлено широкое распространение и значительное разнообразие кислого пирокластического материала в деревянногорской свите. Впервые выявлено не менее пяти слоев пеплов риолитового состава в разрезе. Целью настоящей статьи является типизация вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород верхнего мела в районе мыса Утес Деревянных Гор и представление новых данных, позволяющих судить о генезисе вулканических пеплов деревянногорской свиты.

1. Методика отбора проб и методы исследования

Верхнемеловые отложения о. Новая Сибирь в основном не литифицированы, но находятся в мерзлом состоянии. При отборе образцов места взятия проб тщательно зачищались от оттаявшего в летнее время грунта для исключения засорения проб посторонним материалом. Мерзлая порода высушивалась сразу после оттаивания и упаковывалась без потери каких-либо компонентов. В ста-

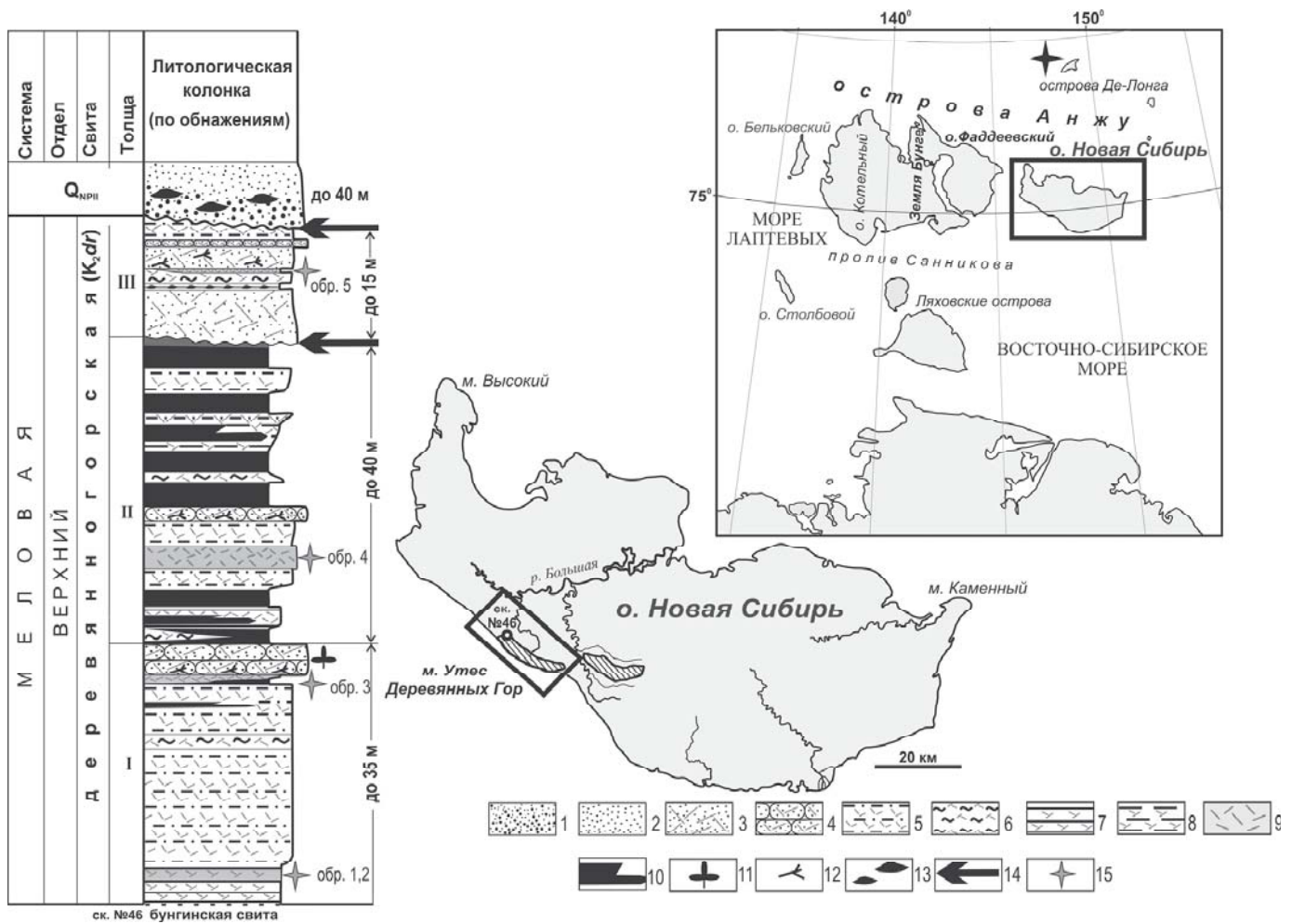


Рис. 1. Региональное положение о. Новая Сибирь, поля распространения верхнемеловых отложений

(по [2], показано штриховкой) и сводный разрез деревянногорской свиты в районе мыса Утес Деревянных Гор:

- 1 — пески гравелитистые; 2 — пески; 3 — туффы риолитовые псаммитовые нелитифицированные; 4 — туффы псаммитовые литифицированные и туфопесчаники риолитовые; 5 — туффы риолитовые алевритовые нелитифицированные и туфоалевриты; 6 — туффы риолитовые алевритовые литифицированные и туфоалевролиты; 7 — туффы риолитовые пелитовые нелитифицированные и туфопелиты; 8 — туффы риолитовые пелитовые литифицированные и туфоаргиллиты; 9 — пепел риолитовый; 10 — угли бурые; 11 — отпечатки листьев меловой флоры; 12 — обломки углефицированных стволов деревьев; 13 — переотложенный уголь бурый; 14 — угловое несогласие; 15 — положение в разрезе исследованных образцов пеплов

[Figure 1. Regional position of Novaya Sibir Island, fields of distribution of Upper Cretaceous deposits

(by [2], it's shown by shading) and composite section of Derevyannyye Gory Formation in area of cape Utes Derevyannykh Gor]

тъе приводится макроскопическое описание отложений в оттаявшем состоянии.

Минералого-петрографическое изучение пород проведено в прозрачных покрытых шлифах при помощи поляризационного микроскопа. Рыхлые пеплы изучались в шлифах с эпоксидным цементом (показатель преломления ~ 1,57). Рентгенофазовый анализ глинистой фракции (<2 μm) проводился с помощью дифрактометра ДРОН-3 в ориентированных препаратах: воздушно-сухом, насыщенном этиленгликолем и прокаленном (до 550 °С) состояниях (МГУ имени М.В. Ломоносова, аналитик В.Л. Косоруков, кафедра литологии и морской геологии). Изображение пеплов в отраженных элек-

тронах (BSE) и микрорентгеноспектральные химические анализы витрокластов выполнены на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM-6480LV с микроанализатором Oxford Instruments INCA-Energy 350 (МГУ имени М.В. Ломоносова, аналитик Н.Н. Кошлякова, лаборатория локальных методов исследования вещества).

2. Типизация верхнемеловых вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород о. Новая Сибирь

В основу типизации положена классификация, отраженная в Петрографическом кодексе, с неко-

торыми изменениями согласно А.В. Вану и Ю.П. Казанскому [12; 13].

К пеплам мы относим рыхлые взрыво-обломочные отложения, на 90—100 % сложенные необработанным пирокластическим материалом размером менее 2,0 мм [13]. Верхнемеловой разрез о. Новая Сибирь сложен в основном терригенно-вулканокластическими породами: нелитифицированными кристалло-витрокластическим и витрокластическим риолитовым туффитам пелитовой, алевроитовой и псаммитовой размерности с содержанием необработанной пирокластики от 90 до 50 % (рис. 1, литологическая колонка). Реже встречаются литифицированные, сходные по составу туффиты. Иногда в разрезе наблюдаются вулканокласто-терригенные (туфогенные) отложения с более низкой долей сингенетичной пирокластики — от 50 до 10 % и высоким содержанием терригенного материала (50—90 %) — туфопески, туфоалевриты и туфопелиты. Наиболее широко распространены нелитифицированные отложения подобного типа, реже встречаются литифицированные разновидности.

Ювенильные пирокластические компоненты в тонкозернистых (алевропелитовых) отложениях представлены кристаллокластами биотита и кислым вулканическим стеклом, пылеватая фракция которого девитрифицирована и преобразована в смектит и иллит-смектит, иногда в смеси с гейландитом и тридимитом. В некоторых образцах присутствует резургентный материал в виде девитрифицированных частиц вулканических стекол с аксиолитовой внутренней структурой. В псаммитовых отложениях присутствуют идиоморфные кристаллокласты кварца с нормальным погасанием и зернированной поверхностью.

Терригенные компоненты представлены кварцем (метаморфогенным и гранитоидным), плагиоклазами, калиевыми полевыми шпатами, а также обломками пород: фельзитами, сферолитфельзитами, углистыми аргиллитами, алевролитами, слюдисто-кварцевыми метаморфитами, иногда измененными базальтами. Часто присутствуют тонкие чешуйки светлой слюды. Степень окатанности терригенного материала в псаммитах плохая и средняя. Среди глинистых терригенных компонентов наблюдается каолинит и иллит.

3. Краткое описание разреза

Предыдущими исследователями было выявлено трехчленное строение деревянногорской свиты [3].

В естественных обнажениях в районе мыса Утес Деревянных Гор нами также выделено три толщи (снизу вверх): подугольная (I), угленосная (II) и надугольная (III) (рис. 1). Общая видимая мощность разреза составляет около 95 м. Верхнемеловые отложения с размывом и угловым несогласием перекрыты среднелепесточной континентальной терригенной толщей мощностью до 40 м, которая ранее датировалась плиоценом [2]. Отложения верхнего мела и среднего неоплейстоцена совместно гляциодислоцированы: разбиты серией надвигов северо-западного простирания на пластины, внутри которых слои смяты в складки или залегают моноклинально с падением на северо-восток. Вкрест простирания структур наблюдается неоднократное повторение разрезов.

Толщи, слагающие деревянногорскую свиту, имеют в различной степени выраженное циклическое строение. Циклиты обычно характеризуются регрессивной направленностью.

В основании видимой части разреза подугольной толщи (I) залегают зеленовато-коричневые и шоколадно-коричневые (углистые) пелитовые и алевропелитовые нелитифицированные туффиты, которые вверх по разрезу постепенно сменяются несколько более крупнозернистыми зеленовато-серыми и светло-серыми пелито-алевритовыми и алевроитовыми туффитами, включающими два маломощных (0,2—0,5 м) прерывистых пласта бурых углей. В нижней и верхней частях подугольной толщи выявлены два не выдержанных по мощности (0,3—1,0 м) слоя зеленых вязких вулканических пеплов. В кровле толщи залегают туффиты псаммитовые литифицированные светло-серые и розовато-серые на свежем сколе, разнозернистые, с плитчатой отдельностью, фрагментами углефицированных стволов деревьев и многочисленными отпечатками листовой флоры на поверхностях напластования (рис. 1, литологическая колонка). Именно по этим флороносным породам были изучены многочисленные виды новосибирской флоры туронского возраста [6; 7]. Максимальная видимая мощность толщи достигает 35 м.

Выше согласно, без признаков размыва залегают угленосная толща (II), разрез которой имеет ярко выраженное циклическое строение. Нами установлено не менее пяти регрессивных циклитов с пластами бурых углей в основании. Мощность угольных пластов составляет 3,0—7,0 м. Для угольных пластов характерны невыдержанность мощностей

по простиранию и прослои темно-серых углистых пелитовых и алевропелитовых туффитов. Иногда буроугольные пласты подстилаются линзующимися прослоями сидерита (0,2—0,4 м). Верхняя часть циклитов обычно представлена светло-серыми алевритовыми и псаммито-алевроитовыми туффитами или туфоалевроитами и туфопесками, реже присутствуют литифицированные псаммитовые плитчатые туффиты (до 1,0 м) с редкими отпечатками листовой флоры и хаотично расположенными фрагментами древесных стволов в подошве слоя.

В средней части угленосной толщи залегает однородный слой светло-серого алевритового вулканического пепла мощностью 2,5 м (рис. 1, литологическая колонка). Верхняя часть толщи эродирована. В большинстве разрезов толща заканчивается пластом бурого угля, в кровле которого наблюдаются явные признаки выветривания. Мощность угленосной толщи составляет около 40 м.

Выше по разрезу с размывом, угловым и азимутальным несогласием залегает надугольная толща (III). Верхняя часть толщи эродирована. На изученной площади мощность надугольной толщи колеблется от 2 до 15 м. В наиболее полных разрезах наблюдается цикличность. Нижняя часть циклитов образована светлыми бежево-серыми рыхлыми туффитами алевритовыми, которые вверх по разрезу постепенно сменяются алевро-псаммитовыми туффитами, слагающими верхнюю часть циклитов. Иногда в основании циклитов залегают очень тонкозернистые темно-серые углистые туффиты или туфопелиты, тогда как в верхней части циклитов могут присутствовать маломощные (до 0,5 м) прослои псаммитовых туффитов. В отложениях встречаются углефицированные остатки корневой системы растений и фрагменты древесных стволов, ориентированные в юго-западном направлении. В некоторых обнажениях прослеживается маломощный (0,2—0,5 м) слой зеленого вязкого алеврито-пелитового вулканического пепла.

4. Вещественный состав вулканических пеплов

В деревянногорской свите нами установлено не менее четырех слоев вулканических пеплов. Их положение в разрезе показано на рис. 1 (литологическая колонка). В подугольной и надугольной толщах встречаются в основном неслоистые алеврито-пелитовые и пелито-алевроитовые пеплы, которые

в обнажениях выглядят как пластичные вязкие зеленые глины. В шлифах наблюдается комковатая текстура, псаммито-алевроито-пелитовая кристалло-витрокластическая структура; характерна средняя сортировка и беспорядочная, хаотичная ориентировка пепловых частиц. Количество необработанного изотропного прозрачного вулканического стекла крупнопелитовой, реже алевритовой размерности (0,01—0,005 мм) составляет 30—50 %. Форма витрокластов остроугольная рогульчатая, каплевидная. В пепловой массе хаотично рассеяны кристаллокласты красновато-коричневого и зеленовато-коричневого биотита (0,5—0,1 мм и менее), иногда слабо опацитизированного, часто со следами отламывания. Количество биотита колеблется от 10 до 50 % (рис. 2).

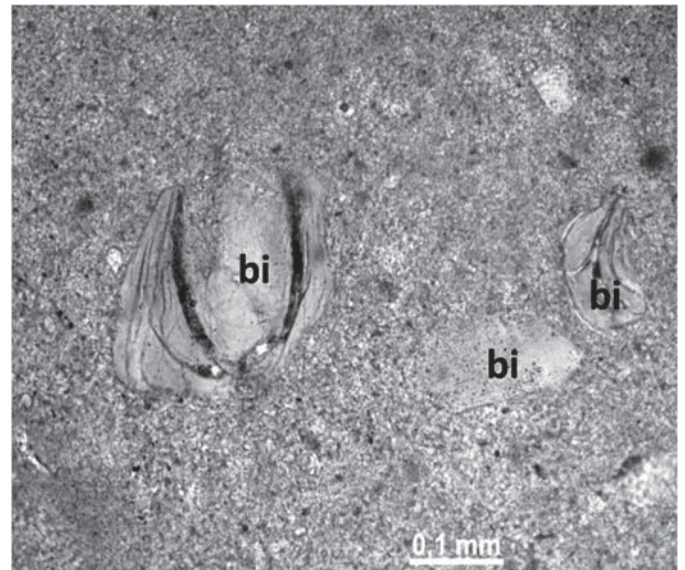


Рис. 2. Микрофотография риолитового алеврито-пелитового кристалло-витрокластического пепла с крупными кристаллокластами биотита. Верхний мел, деревянногорская свита, подугольная толща, мыс Утес Деревянных Гор [Figure 2. Microphotograph of rhyolitic aleuropelitic crystal-vitric ashes with large biotite crystalloclast. Upper Cretaceous, Derevyannye Gory Formation, podugolnaya series, cape Utes Derevyannykh Gor]

В некоторых образцах присутствует предположительно резургентный материал алевритовой размерности в виде кристаллокластов кварца копьевидной формы и девитрифицированных пепловых частиц с аксиолитовой внутренней структурой.

Матрикс пеплов тонкопелитовый (20—60 %). По данным рентгенофазового анализа в составе глинистой фракции преобладает смектит (49—73 %), присутствует смешанослойный иллит-смектит (до 34 %) (табл. 1, образцы № 1—3).

Таблица 1/Table 1

Относительное содержание минералов глинистой фракции в вулканических пеплах, %
[Abundance of minerals of clay fraction in volcanic ashes, %]

№ образца	S	I	I-S	Kl	Ceo	Td	Total
1	50	11	34	5	0	0	100
2	49	7	34	6	0	4	100
3	73	9	13	5	0	0	100
4	93	4	0	3	0	0	100
5	37	3	3	5	49	3	100

Примечание: S — смектит; I — иллит; Kl — каолинит; Td — тридимит; Ceo — цеолит; I-S — иллит-смектит.

Note: S — smectite; I — illite; Kl — kaolinite; Td — tridymite; Ceo — zeolite; I-S — illite-smectite.

Смектитовые глинистые минералы образовались, по-видимому, в результате постседиментационной трансформации наиболее тонкодисперсной витрокластике. В образце пепла № 5 (надугольная толща) с пониженным содержанием смектита наблюдается значительное количество гейландита. В некоторых образцах присутствует тридимит, который наряду с другими компонентами также является продуктом преобразования пылеватой фракции вулканического стекла. Относительное содержание терригенных глинистых минералов — иллита и каолинита — в глинистой фракции пеплов низкое и в сумме не превышает 7—16 %.

Наиболее детально нами изучен слой алевроитового пепла из угленосной толщи, вскрывающейся в борту безымянного ручья на востоке Деревянных Гор. При макроскопических наблюдениях пепел светло-серого цвета, на выветрелой поверхности почти белый, хорошо средне сортированный, с нечетливо проявленной горизонтальной слоистостью (слабостратифицированный) (рис. 3). В отличие от вмещающих пород, слой пепла не содержит углефицированных растительных остатков.

В петрографических шлифах наблюдается витрокластическая пелито-алевритовая и пелитопсаммито-алевритовая структура, средняя сортированность и беспорядочная микротекстура. Пелитовый материал (до 10 %) по данным рентгенофазового анализа представлен смектитом, который является продуктом разложения наиболее тонкодисперсной фракции вулканического стекла (табл. 1, образец № 4). Присутствуют единичные кристаллокласты зеленовато-коричневого биотита. Вулканическое стекло алевроитовой (0,1—0,01 мм), редко мелкопсаммитовой (до 0,15 мм) размерности, без признаков окатанности, бесцветное, прозрач-

ное, полностью изотропное, с показателем преломления много ниже эпоксидной смолы. Преобладают остроугольная, вытянутая и рогульчатая формы витрокластов. На микрофотографии вулканического пепла в отраженных электронах также наблюдаются витрокласты с единичными или множественными газовыми полостями (рис. 4).



Рис. 3. Слой риолитового пепла в разрезе угленосной толщи (указан стрелкой). Верхний мел, деревянногорская свита, мыс Утес Деревянных Гор

[Figure 3. Layer of rhyolitic ashes in a section of carboniferous series (specified by arrow). Upper Cretaceous, Derevyannye Gory Formation, cape Utes Derevyannykh Gor]



Рис. 4. Микрофотография пепла риолитового витрокластического в отраженных электронах.

Верхний мел, деревянногорская свита, угленосная толща, мыс Утес Деревянных Гор. Цифрами обозначены номера микроанализов (Spectrum), приведенные в табл. 2

[Figure 4. Microphotograph of rhyolitic vitroclastic ashes in the reflected electrons. Upper Cretaceous, Derevyannye Gory Formation, carboniferous series, cape Utes Derevyannykh Gor. Figures designated numbers of chemical X-ray microanalysis (Spectrum) shown in Table 2]

Микроанализы различных морфологических типов вулкани-

ческих стекол показали сходные результаты (табл. 2).

Количество SiO₂ составляет 72,90–75,12 %, суммарное содержание оксидов щелочных металлов (Na₂O + K₂O) колеблется от 4,52 до 7,25 %. В соответствии с петрохимическими показателями, изученный вулканический пепел на диаграмме TAS (Total alkali-silica diagram) располагается в пределах двух диагностических полей — низкощелочных и нормальнощелочных риолитов (рис. 5, а). Величины отношения Na₂O/K₂O (0,12–0,26 %) во всех проанализированных частицах вулканического стекла близкие и свидетельствуют о калиевом типе щелочности. Содержание K₂O в них составляет 4,01–5,88 %. На диаграмме, построенной в координатах K₂O—SiO₂ [12], исследованное риолитовое стекло относится к высококалийевой разновидности (рис. 5, б). Таким образом, петрохимические показатели позволяют относить вулканические пеплы деревянногорской свиты к низко- и нормальнощелочному высококалийевым типам риолитов.

Таблица 2/Table 2

Результаты микрорентгеноспектрального химического анализа витрокластов (образец № 4)
[Chemical X-ray microanalysis results of vitroclasts (sample no. 4)]

№ Spectrum	Оксиды [Oxides], %									
	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Total
02	1,18	—	11,28	73,75	0,14	5,21	0,78	0,13	0,87	93,34
03	1,37	—	11,4	74,36	0,12	5,88	0,71	0,08	0,89	94,81
04	1,17	—	11,38	74,78	0,1	5,22	0,79	0,1	0,89	94,43
05	0,95	0,08	11,47	74,04	0,12	4,98	0,8	0,12	0,87	93,43
06	0,93	0,08	11,38	73,98	0,13	5,05	0,8	0,11	0,96	93,42
07	0,49	0,08	11,07	73,71	0,10	4,03	0,69	0,07	0,91	91,15
08	0,84	0,06	11,21	72,90	0,12	4,52	0,79	0,11	0,91	91,47
09	0,51	0,09	11,69	75,55	0,12	4,01	0,84	0,12	0,88	93,81
10	1,07	0,08	11,45	74,3	0,16	5,1	0,86	0,12	1,00	94,14
11	1,36	0,08	11,57	75,12	0,1	5,92	0,88	0,12	0,86	96,01
12	0,76	0,10	11,21	73,54	0,12	4,49	0,79	0,11	0,92	92,04

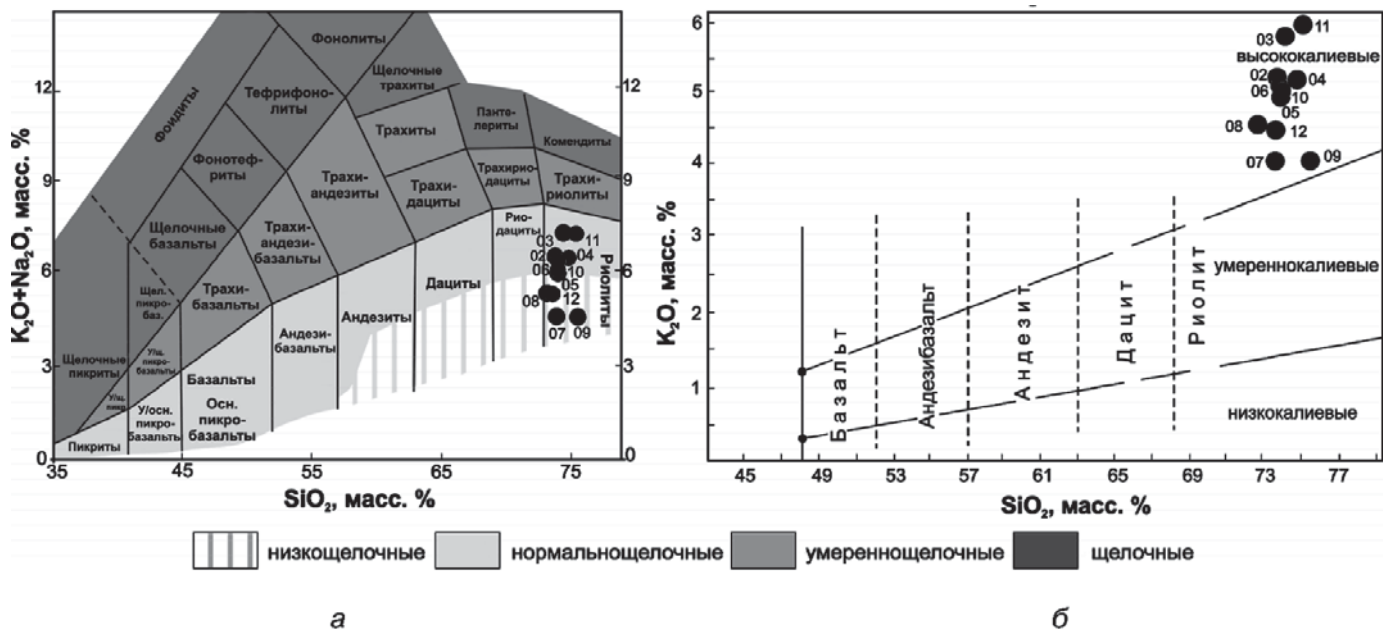


Рис. 5. Диаграммы
 а — TAS для вулкаников в координатах содержания SiO₂ и суммы щелочей (масс. %);
 б — зависимость содержания K₂O от SiO₂ (масс. %). Поля на диаграммах нанесены по [12]
 [Figure 5. Graphical chart:
 а — TAS for volcanics, coordinates indicate content of SiO₂ and the sum of alkalis (% wt);
 б — relationship between the K₂O content and SiO₂ (% wt). Fields on charts are put by [12]]

5. Обсуждение результатов

Детальное опробование разреза верхнемеловых пород в районе мыса Утес Деревянных Гор на о. Новая Сибирь позволило выявить широкое распространение терригенно-вулканокластических образований — риолитовых туффитов пелитовой, алевритовой и псаммитовой размерности. Установлено, что, помимо туффитов и менее распространенных туфогенных отложений, в деревянногорской свите присутствуют слои тонкозернистых кристалло-витрокластических и витрокластических вулканических пеплов. Таким образом, в позднемеловое время терригенная седиментация на данной территории сопровождалась практически непрерывной эксплозивной вулканической деятельностью и накоплением в осадках продуктов кислого вулканизма. Эти процессы были значительно более интенсивными, чем предполагали предыдущие исследователи [8]. Пепловые слои нарушают седиментационную цикличность, характеризуются средней отсортированностью, однородным минеральным и химическим составом пирокластического материала. Слои пеплов имеют довольно значительную мощность (0,3—2,5 м) и в разрезе не образуют парагенезов с какими-либо иными продуктами эксплозивного вулканизма: отложениями пирокластических потоков, волн и пепловых облаков пирокластических потоков. Следовательно, они образовались путем осаждения из принесенных ветром пепловых шлейфов, ранее отсепарированных из эруптивной колонны при одиночных или серии субодновременных извержений различной силы [14]. Палеовулканический центр или группа подобных центров находились, по видимому, на расстоянии не более 100 км от области седиментации. Основываясь на имеющихся в литературе данных об эоловом распространении кислой пирокластики от центра извержения, можно заключить, что в случае расположения области седиментации на более значительном удалении от вулканического центра мощность прослоев пепла, даже при катастрофических эксплозиях, не превышала бы нескольких сантиметров [15]. В ближайшем к Новосибирским островам секторе Северо-Восточной Арктики кислые вулканические породы верхнего мела (94—84 млн лет) известны в пределах Охотско-Чукотского вулканического пояса (ОЧВП) [16]. Однако, вследствие значительного расстояния (до 1000 км), предположение о том, что источником поступления риолитовых пеплов в район Новосибирских островов в туроне-коньяке были действу-

ющие вулканы ОЧВП, представляется маловероятным. В пользу близкого расположения вулканических центров свидетельствует присутствие в псаммитовых туффитах среди пирокластического материала идиоморфных кристаллокластов кварца с резорбированной поверхностью, а в пеплах — резургентного вулканического материала и значительного количества кристаллокластов ювенильного биотита.

Известно, что на островах Котельный, Земля Бунге, Фаддеевский и на севере пролива Санникова широко развиты нижнеальбские высококальциевые низко- и нормальнощелочные (изредка щелочные) риолиты, риолитовые игнимбриты и туфы калий-натрового и калиевого типа щелочности (верхи балыктахской свиты, тугуттахская толща) [1; 11; 17]. На островах Земле Бунге и Фаддеевский мощность риолитового покрова составляет 50—60 м [2]. На о. Котельный суммарная мощность прослоев риолитовых вулканогенных пород достигает 170 м, а возможно и более [11]. А.Б. Кузьмичев с соавторами предполагают, что на о. Котельный палеовулканические постройки располагались в его центральной части (район среднего течения р. Балыктах) [11]. Наиболее вероятно, что в позднем мелу действующие центры кислого эксплозивного вулканизма были унаследованы с конца раннего мела и могли располагаться не только на о. Котельный, но и на островах Земля Бунге, Фаддеевский и в проливе Санникова, хотя явных следов древних вулканических построек или кальдер в пределах последних пока не обнаружено. Петрохимические данные также свидетельствуют о единой природе магматического очага нижнеальбских и турон-коньякских риолитовых вулканитов архипелага Анжу.

Выводы

1. Полевые наблюдения естественных обнажений верхнего мела деревянногорской свиты на о. Новая Сибирь в районе мыса Утес Деревянных Гор и последующие минералого-петрографические исследования пород показали, что свита сложена преимущественно кристалло-витрокластическими и витрокластическими туффитами при подчиненной роли туфогенных образований. В составе свиты впервые выявлено не менее четырех слоев тонкозернистых риолитовых пеплов, что свидетельствует об относительно непрерывной и весьма интенсивной эксплозивной вулканической деятельности в турон-коньякское время.

2. По имеющимся к настоящему времени данным сложно определить характер позднемеловых извержений. Однако есть все основания предполагать, что слои пеплов в деревянногорской свите накопились в результате выпадения мелко-тонкозернистой тефры из пепловых шлейфов, отделившихся от эруптивной колонны при вулканических извержениях различной силы (одиночных или серии субодновременных); распространение пепловых шлейфов контролировалось направлением ветров.

3. Значительные мощности пеплов (до 2,5 м), особенности гранулометрического и вещественного составов пирокластики (присутствие обломков вулканического стекла псаммито-алевритовой размерности, крупных кристаллокластов ювенильного биотита, девитрифицированного стекловатого резургентного материала) свидетельствуют о близком (до 100 км) расположении позднемеловых вулканических центров относительно изученной территории. Позднемеловые вулканические центры, по-видимому, были унаследованы с раннеальбского времени. Ближайшие из них могли располагаться в пределах Земли Бунге и в северной части пролива Санникова. Близкое петрохимическое соответствие верхнемеловых пеплов о. Новая Сибирь и нижнеальбских риолитов, игнимбригов и туфов, развитых на других островах архипелага Анжу, позволяет предположить единство магматического очага при извержениях кислой магмы в конце раннего мела и в позднем мелу.

Дальнейшие исследования вещественного состава верхнемеловых пеплов и туффитов деревянногорской свиты позволят более определенно установить генезис пирокластического материала.

Список литературы

- [1] Труфанов Г.В., Бондаренко Н.М., Абрамова Л.Н. Верхнемеловые отложения островов Анжу Новосибирского архипелага // Верхний палеозой и мезозой островов и побережья арктических морей СССР. Л.: Изд-во НИИГА, 1979. С. 121—125.
- [2] Труфанов Г.В., Белоусов К.Н., Непомилуев В.Ф. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:200000. Листы Т-54-XXXIV, XXXV, XXXVI; Т-56-XXXIII; S-54-IV,V, VI, X, XI, XII; S-55-I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XI, XII; S-56-III, VII. Объяснительная записка. М.: Мингео, 1986. (Серия «Новосибирские острова»).
- [3] Kos'ko M.K., Trufanov G.V. Middle Cretaceous to Eopleistocene Sequences on the New Siberian Islands: an approach to interpret offshore seismic // *Marine and Petroleum Geology*. Vol. 19. No. 7. Pp. 901—919.
- [4] Данукалова М.К., Кузьмичев А.Б. Деревянные горы (о. Новая Сибирь): складчато-надвиговой ороген неоплейстоценового возраста // *Тектоника складчатых поясов Евразии: сходство, различие, характерные черты новейшего горообразования, региональные обобщения: материалы XLVI тектон. совещ.* Т. 1. 2014. С. 104—106.
- [5] Бондаренко Н.М. Состав и распространение спор и пыльцы в верхнем мелу острова Новая Сибирь (Новосибирские острова) // *Палеонтологическое обоснование расчленения палеозоя и мезозоя арктических районов СССР*. Л.: Севморгеология, 1983. С. 149—156.
- [6] Герман А.Б., Александрова Г.Н., Кузьмичев А.Б. Фито-стратиграфические и палеоклиматические исследования неморского мела Новосибирских островов (острова Котельный и Новая Сибирь) // *Строение и история развития литосферы. Вклад России в Международный полярный год 2007/08* / под ред. Ю.Г. Леонова. М.; СПб.: Paulsen Editions, 2010. С. 384—402.
- [7] Герман А.Б., Костылева В.В., Никольский П.А., Басилян А.Э., Котельников А.Е. Новые данные о позднемеловой флоре острова Новая Сибирь (Новосибирские острова) // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*. 2018. (В печати.)
- [8] Иванов О.А., Яшин Д.С. Новые данные о геологическом строении острова Новая Сибирь // *Труды НИИГА*. 1959. Т. 96. Вып. 8. С. 61—78.
- [9] Гросвальд М.Г. Признаки покровного оледенения Новосибирских островов и прилегающего шельфа // *Докл. АН СССР*. 1988. Т. 302. № 3. С. 654—659.
- [10] Басилян А.Э., Никольский П.А., Анисимов М.А. Плейстоценовое оледенение Новосибирских островов — сомнений больше нет // *Новости МПГ 2007/2008*. 2008. № 12. С. 7—9.
- [11] Кузьмичев А.Б., Александрова Г.Н., Герман А.Б. Аптальбские угленосные отложения острова Котельный (Новосибирские острова): новые данные о строении разреза и игнимбриговом вулканизме // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*. 2009. Т. 17. № 5. С. 69—94.
- [12] Петрографический кодекс. Магматические метаморфические, метасоматические, импактные образования. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2008.
- [13] Ван А.В., Казанский Ю.П. Вулканокластический материал в осадках и осадочных породах. Новосибирск: Наука, 1985. 128 с.
- [14] Гирина О.А. Конвективная гравитационная дифференциация пирокластики андезитовых вулканов // *Литосфера*. 2010. № 3. С. 135—144.
- [15] Пономарева В.В. Крупнейшие эксплозивные вулканические извержения и применение их тефры для датирования и корреляции форм рельефа и отложений: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. М., 2010.
- [16] Соловьев В.И. Верхнемеловые игнимбригиты Куйдусунской наложенной впадины // *Вулканические и интрузивные формации Приохотья*. Новосибирск: Наука, 1976. 188 с.
- [17] Бургуто А.Г., Авдюничев В.В., Дорофеев В.К., Журавлев В.А., Зуйкова О.Н., Иванова А.М., Иванова В.В., Не-

упокоева А.А., Пашковская Е.А., Радченко М.С., Рекант П.В., Шкарубо С.И. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Лист S–53 (о. Столбовой), 54 (Ляховские о-ва). Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. (Серия «Лаптево-Сибироморская»).

Для цитирования:

Костылева В.В., Шепетова Е.В., Котельников А.Е. Верхнемеловые риолитовые пеплы Деревянных Гор (остров Новая Сибирь, Новосибирские острова) // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 1. С. 37–47. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-37-47

Research paper

Upper Cretaceous rhyolitic ashes in the Utes Derevyannykh Gor area (Novaya Sibir Island, the New Siberian Islands)

V.V. Kostyleva*, E.V. Shchepetova†, A.E. Kotelnikov‡

*† Geological Institute of RAS, 7 Pyzhevsky Lane, Moscow, 110017, Russian Federation

‡ Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation

Article history:

Received: November 16, 2018

Revised: February 22, 2019

Accepted: February 28, 2019

Keywords:

North East Arctic;

The New Siberian Islands;

Upper Cretaceous;

rhyolitic volcanism

The article is concerned with the first finds of rhyolite ashes in Upper Cretaceous sediments of Novaya Sibir Island. In the course of the field work in the area of cape Utes Derevyannykh Gor in 2016, four layers of unlithified fine-grained ashes were found in the Turonian-Coniacian coal-bearing Derevyannye Gory Formation. The article presents the results of petrographic, X-ray diffractometric and microprobe analysis of pyroclastics from ash layers. A typification of volcanogenic-terigenous deposits is proposed. Thin section of the samples were investigated on a polarizing microscope. X-ray phase analysis of the clay fraction was carried out using a DRON-3 diffractometer. X-ray microanalysis of vitroclasts were carried out on a scanning electron microscope “Jeol JSM-6480LV” with the microprobe analyzer “Oxford Instruments INCA-Energy 350”. It was established that Derevyannye Gory Formation is composed of rhyolitic tuffites, among which fine-grained crystal-vitroclastic and vitroclastic ashes of low and normal alkaline high-potassium rhyolites with thickness up to 2.5 m. Low pyroclastics sediments are not widespread. New data on the structure and composition of the Derevyannye Gory Formation confirm the hypothesis of previous researchers, that sedimentation in the Late Cretaceous in the area of Novaya Sibir Island was accompanied by explosive acidic volcanism. The main purpose of the article is to discuss the sources of pyroclastic material for the territory of the New Siberian Islands in the Turonian-Coniacian age. The conclusion is made about the territorial proximity of the paleovolcanic eruption center to the area of sedimentation. It is assumed that the paleovolcanic centers were located within the present territory of Kotelny, Zemlya Bunge, Faddeevsky islands and, probably, were inherited from the Early Albian stage.

References

- [1] Trufanov GV, Bondarenko NM, Abramova LN. *Verkhnemelovye otlozheniya ostrovov Anzhu Novosibirskogo arhipelaga [Upper Paleozoic and Mesozoic of islands and coast of Arctic seas of the USSR]*. Leningrad: NIIGA Publ.; 1979. (In Russ.)
- [2] Trufanov GV, Belousov KN, Nepomiluev VF. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:200000. Listy T-54-XXXIV, XXXV, XXXVI; T-56-XXXIII;*

Acknowledgements. This study has been carried out following the plans of the scientific research of the Geological Institute of RAS (projects No. 0135-2018-0034 (VK), No. 0135-2016-0004 (ESh). Field work and analytical studies were supported by “RN-Shelf-Arctic” Oil Company (Novaya Sibir Island).

* Senior Researcher of Laboratory of Comparative Analysis of Sedimentary Basin, PhD in Geology, PhD in Geology; kovikto@yandex.ru

† Senior Researcher of Laboratory of Sedimentology and Geochemistry of Sedimentary Basin, PhD in Geology

‡ Assistant Professor of Department of Mineral Developing and Oil & Gas Engineering, Engineering Academy, PhD in Geology

- S-54-IV, V, VI, X, XI, XII; S-55-I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XI, XII; S-56-III, VII. *Ob'yasnitel'naya zapiska (Seriya "Novosibirskie ostrova")* [Geological map of the USSR, scale 1:200 000. Quadrangles T-54-XXXIV, XXXV, XXXVI; T-56-XXXIII; S-54-IV, V, VI, X, XI, XII; S-55-I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XII; S-56-III, VII. In N.A. Borschova (Ed.). *Explanatory note (The New Siberian Islands Series)*]. Moscow: Mingeo Publ.; 1986. (In Russ.)
- [3] Kos'ko MK, Trufanov GV. Middle Cretaceous to Eopleistocene Sequences on the New Siberian Islands: an approach to interpret offshore seismic. *Marine and Petroleum Geology*. 2002;(19): 901–919.
- [4] Danukalova MK, Kuz'michev AB. Derevyannye gory (o. Novaya Sibir'): skladchato-nadvigovyi orogen neopleistotsenovogo vozrasta [Derevyannye Gory (Novaya Sibir Island): Neo-Pleistocene fold-thrust orogen]. *Tektonika skladchatykh pojasov Evrazii: skhodstvo, razlichie, kharakternye cherty noveishego gorooobrazovaniya, regional'nye obobshcheniya: materialy XLVI tekton. soveshch. [Tectonics of folded belts of Eurasia: similarity, distinction, characteristic features of the latest mountain building, regional generalizations: materials of XLVI tectonic meeting]*. 2014;1: 104–106.
- [5] Bondarenko NM. Sostav i rasprostranenie spor i pyl'tsy v verkhnem melu ostrova Novaya Sibir' (Novosibirskie ostrova) [Structure and allocation of sporules and pollen in Upper Cretaceous of Novaya Sibir Island (the New Siberian Islands)]. *Paleontologicheskoe obosnovanie raschleneniya paleozoya i mezozoya arkticheskikh raionov SSSR [Paleontologic justification of Paleozoic and Mesozoic partition of the USSR Arctic districts]*. Leningrad: Sevmorgeologiya Publ.; 1983. p. 149–156. (In Russ.)
- [6] German AB, Aleksandrova GN, Kuz'michev AB. Fitostratigraficheskie i paleoklimaticheskie issledovaniya nemorskogo mela Novosibirskikh ostrovov (ostrova Kotel'nyi i Novaya Sibir') [Fitostratigraphic and paleoclimatologic researches of not sea Cretaceous deposits of the New Siberian Islands (Kotelny and Novaya Sibir Islands)]. In: Leonov YuG. (ed.) *Stroenie i istoriya razvitiya litosfery. Vklad Rossii v Mezhdunarodnyi polyarnyi god 2007/08 [Structure and history of development of a lithosphere. A contribution of Russia in the International Polar Year 2007/08]*. Moscow, Saint Petersburg: Paulsen Editions Publ.; 2010. p. 384–402. (In Russ.)
- [7] German AB, Kostyleva VV, Nikol'skii PA, Basilyan AE, Kotel'nikov AE. Novye dannye o pozdnemelovoi flore ostrova Novaya Sibir' (Novosibirskie ostrova) [New data on Late Cretaceous flora of Novaya Sibir Island (the New Siberian Islands)]. *Stratigrafiya. Geologicheskaya korrelyatsiya [Stratigraphy. Geological correlation]*. 2018. (In press.) (In Russ.)
- [8] Ivanov OA, Yashin DS. Novye dannye o geologicheskom stroenii ostrova Novaya Sibir' [New data on a geological structure of Novaya Sibir Island]. *Trudy NIIGA [Materials of NIIGA]*. 1959;96(8): 61–78. (In Russ.)
- [9] Grosval'd MG. Priznaki pokrovnogo oledneniya Novosibirskikh ostrovov i prilgayushchego shel'fa [Signs of glaciation of the New Siberian Islands and adjacent shelf]. *Dokl. AN SSSR [Reports of Academy of Sciences of the USSR]*. 1988;302(3): 654–659. (In Russ.)
- [10] Basilyan AE, Nikol'skii PA, Anisimov MA. Pleistotsenovoe olednenie Novosibirskikh ostrovov — somnenii bol'she net [Pleistocene glaciation of the New Siberian Islands — there are no doubts anymore]. *Novosti MPG 2007/2008 [IPY News 2007/2008]*. 2008;(12): 7–9. (In Russ.)
- [11] Kuz'michev AB, Aleksandrova GN, German AB. Apt-al'bskie ughenosnye otlozheniya ostrova Kotel'nyi (Novosibirskie ostrova): novye dannye o stroenii razreza i ignimbritovom vulkanizme [Aptian-Albian carboniferous deposits of Kotelny Island (the New Siberian Islands): new data on a structure of section and ignimbrite volcanism]. *Stratigrafiya. Geologicheskaya korrelyatsiya [Stratigraphy. Geological correlation]*. 2009;17(5): 69–94. (In Russ.)
- [12] *Petrograficheskii kodeks. Magmaticheskie metamorficheskie, metasomaticheskie, impaktnye obrazovaniya*. 2-e izd., pererab. i dop. [Petrographic code. Magmatic metamorphic, metasomatic, impact units. 2nd ed.]. Saint Petersburg: VSEGEI Publ.; 2008. (In Russ.)
- [13] Van AV, Kazanskii YuP. *Vulkanoklasticheskie material v osadkakh i osadochnykh porodakh [Volcaniclastic material in absorbing and sedimentary rocks]*. Novosibirsk: Nauka Publ.; 1985. (In Russ.)
- [14] Girina OA. Konvektivnaya gravitatsionnaya differentsiatsiya piroklastiki andezitovykh vulkanov [Convective gravitational differentiation of pyroclastics of andesitic volcanoes]. *Litosfera [Lithosphere]*. 2010;(3): 135–144. (In Russ.)
- [15] Ponomareva VV. *Krupneishie eksplozivnye vulkanicheskie izverzheniya i primenenie ikh tefry dlya datirovaniya i korrelyatsii form rel'efa i otlozhenii*: avtoref. dis. ... d-ra geogr. nauk [The largest explosive volcanic eruptions and application of their tephra for dating and correlation of forms of a relief and deposits: abstracts of Doctor of Geographical Sciences theses]. Moscow; 2010. (In Russ.)
- [16] Solov'ev VI. Verkhnemelovye ignimbrity Kuidusunskoi nalozhennoi vpadiny [Upper Cretaceous ignimbrites of Kuydusunsky superimposed depression]. *Vulkanicheskie intruzivnye formatsii Priokhot'ya [Volcanic and intrusive formations of seaside of the Sea of Okhotsk]*. Novosibirsk: Nauka Publ.; 1976. (In Russ.)
- [17] Burguto AG, Avdyunichyev VV, Dorofeev VK, Zhuravlev VA, Zuikova ON, Ivanova AM, Ivanova VV, Neupokoeva AA, Pashkovskaya EA, Radchenko MS, Rekant PV, Shkarubo SI. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi federatsii. Masshtab 1:1 000 000 (tret'e pokolenie). List S-53 (o. Stolbovoy), 54 (Lyakhovskie o-va). Ob'yasnitel'naya zapiska. (Seriya "Laptevo-Sibirromorskaya")* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1 000 000 (third generation). Sheet S-53 (Stolbovoy island), 54 (Lyakhov Islands). Explanatory note. (Laptevo-Sibirromorskaya Series)]. Saint Petersburg: Cartographical factory VSEGEI; 2016. (In Russ.)

For citation:

Kostyleva VV, Shchepetova EV, Kotelnikov AE. Upper Cretaceous rhyolitic ashes in the Utes Derevyannykh Gor area (Novaya Sibir Island, the New Siberian Islands). *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(1): 37–47. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-37-47 (In Russ.)



Научная статья

DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-48-56

УДК 519.714

Актуальное состояние исследований проблем разрушения берегов водных объектов криолитозоны

Е.К. Синиченко*, Ф.В. Рекач†, С.Л. Шамбина‡

Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

История статьи:

Поступила: 14 января 2019

Доработана: 11 февраля 2019

Принята: 27 февраля 2019

Ключевые слова:

анализ работ;
береговые деформации;
криолитозона;
лабораторный эксперимент;
многолетнемерзлые породы

Огромная территория России находится в зоне многолетнемерзлых пород, ввиду чего очень остро стоит вопрос изучения береговых эрозий, происходящих не только во время строительного цикла, но и при последующей работе введенных в эксплуатацию объектов, в частности гидротехнических сооружений. Проведен анализ современных работ зарубежных и отечественных исследователей на предмет изученности разрушения мерзлых берегов водных объектов. Рассмотрено влияние энергии движущегося водного потока на переформирование берегового склона и устойчивость речных русел в целом. Результаты математического и лабораторного моделирования показали, что русловые деформации рек, протекающих в криолитозоне, значительно отличаются от деформаций русел, сложенных грунтами, не подверженных влиянию фазового перехода «вода — лед». Причинами размыва мерзлых берегов в условиях многолетнемерзлых пород является не только механическая, но и термическая составляющие при движении воды, что позволяет говорить о нестабильности мерзлоты как твердого вещества. Все это необходимо учитывать при гидротехническом проектировании.

Введение

Интенсивное гидротехническое строительство в криолитозоне, а также производственная необходимость, связанная с добычей нефти и газа в этих областях, привели к необходимости изучения поведения мерзлых пород, особенно слагающих склоны водных объектов, в изменяющихся сезонных условиях. Глобальные климатические изменения, происходящие в последние десятилетия, существенным образом влияют на гидрологические и

термодинамические процессы в гидросфере Земли и особенно в криолитозоне, так как вынужденные изменения сроков перехода температуры окружающей среды через 0 °С запускают фазовые переходы в системе «вода — лед» в моменты, являющиеся аномальными для конкретных северных территорий. Мерзлые породы, будучи не устойчивыми к смене температуры, способны легко оттаивать и наоборот — переходить из талого в мерзлое состояние, что сопровождается развитием целого ряда

* Доцент департамента строительства, Инженерная академия, к.т.н., доцент; sinichenko_ek@rudn.ru

† Доцент департамента строительства, Инженерная академия, к.т.н., доцент

‡ Доцент департамента строительства, Инженерная академия, к.т.н., доцент

© Синиченко Е.К., Рекач Ф.В., Шамбина С.Л., 2019



неблагоприятных и опасных геокриологических процессов, а также негативными изменениями экологической обстановки. Все это в сочетании с развернувшимся в криолитозоне обширным гидротехническим строительством (ГТС) приводит к нарушениям в гидрологическом балансе сети северных рек. Оттаивание многолетнемерзлых пород (ММП), помимо проблем с гидротехническим и инженерным строительством, оказывает огромное влияние на деструктивные процессы берегов водных объектов, особенно в районах с максимальной льдистостью. Из чрезвычайно стабильной системы мерзлота превращается в уязвимую и неустойчивую.

Появление новых кратеров, обвалов и больших котлованов (например, обнажение Ледяной горы в 120 км южнее Игарки, обнажение Иннокентьевское в устье Енисея, кратер Батагайка неподалеку от бассейна реки Яны, оползень на реке Буря в декабре 2018 года) — это наглядное свидетельство того влияния, которое климатические изменения оказывают на деформационные процессы в водных объектах, расположенных в районах вечной мерзлоты.

Убеждение в том, что мерзлота является цементирующим фактором в случае многолетнемерзлых пород, было весьма распространено до определенного времени. Ранние исследования, основанные на данном убеждении, приводили к спектру противоречивых результатов даже в пределах одного водного объекта. Сравнение абсолютных скоростей боковой эрозии не представляется возможным в случае натурных исследований, но вполне вероятно, что чистый эффект криолитозоны заключается в создании большей стабильности русла в период отрицательных температур, чем в нерегулируемых потоках аналогичного типа в немерзлых средах. Сочетания факторов, особенно тех, которые способствуют высоким темпам термоэрозионного размыва, могут тем не менее вызывать темпы эрозии, требующие осторожности в инженерном проектировании.

1. Влияние мерзлоты на устойчивость речных русел

Предметом внимания многих авторов стало исследование поведения мерзлых русел и воздействия на них движущегося потока, что было продиктовано производственной необходимостью — интенсивным гидротехническим строительством в зоне вечной мерзлоты. Воздействие гидротехнических сооружений на русла в криолитозоне — проблема,

для решения которой необходимо не только проведение изыскательских работ, но и привлечение современных возможностей математического моделирования. В каждом конкретном случае, в соответствии с особенностями мерзлотно-геологических, геоморфологических и гидрологических условий, проявляются те или иные реакции речной системы на гидротехнические сооружения. Главные из них — это русловые деформации на участке нижнего бьефа, изменения термического, ледового и паводкового режимов, а также изменения естественного хода уровня водной поверхности и твердого расхода в различных временных масштабах (суточном, сезонном, многолетнем). Систематические натурные исследования с получением кондиционного фактического материала по этой проблематике в криолитозоне практически не проводились. Трудности с прогнозированием деформаций русел, сложенных ММП, связаны с невозможностью проведения натурных наблюдений в период развития наводнений. Исследование этого сложного и многофакторного процесса может быть выполнено с достаточной степенью адекватности лишь с помощью математического моделирования.

Основные вопросы, которые стояли перед исследователями:

- 1) Как влияет мерзлота на скорости эрозии берегов?
- 2) Какую роль играют весенние наводнения в сравнении с движением потока большую часть года при прочих равных характеристиках русла?

При рассмотрении первого вопроса многие авторы согласились с заключением Леффингвелла [1] о том, что боковая эрозия обычно замедляется в случае мерзлых пород. Купер и Холлингсхед [2] отмечают, что вечная мерзлота стабилизирует породы, которые в немерзлом состоянии сопротивлялись бы размыву гораздо меньше.

Макдональд и Льюис [3] обнаружили, что мерзлота может замедлять эрозию в течение определенных промежутков времени. Было также высказано предположение о том, что, поскольку определенные регулярные течения некоторых объектов (на примере рек Аляски) могут возникать только при наличии мерзлоты, их масштаб значительно меньше по сравнению с масштабами наводнений [4] на тех же объектах.

С другой стороны, Уокер, Арнборг и Ричи [5; 6] подчеркнули роль вечной мерзлоты в продвижении заметной боковой эрозии (в среднем 10 м в одной области) путем бокового подрезания во время раз-

лива реки Колвилл на севере Аляски. Уокер [7] выражает общее убеждение, что боковая эрозия «особенно выражена» в арктической Аляске из-за вечной мерзлоты. Высокие темпы эрозии горной вечной мерзлоты ручьями объясняются «ледяной коркой», легко эродированной поверхностной зоной, которая была разрушена подземным льдом [8].

Какое мнение справедливо, являются ли водные потоки криолитозоны чрезвычайно стабильными или действительно они имеют более чем средние показатели боковой миграции? Очевидно, нужны более детальные исследования.

Исследования по второму вопросу — роли регулярно происходящих наводнений, являющихся причиной размыва склонов и берегов рек — столь же разнообразны. Уокер и Арнборг [5] обнаружили, что во время или вскоре после разлива на реке Колвилл наблюдается значительный размыв, то же наблюдал и Уэйтт [9] для любого из пяти типов формы русла в дельте Маккензи.

Майлз [10] определил, что разлив на острове Банкс в канадской Арктике играл несущественную роль, а значительные изменения в руслах не происходили до летних штормов на острове несколько недель спустя. Наконец, Абрамов [11] отметил тот факт, что размыв в нижнем течении реки Лены в Сибири достигает максимальных значений только к концу лета.

2. Размыв сезонноталого слоя берега водного объекта в условиях ММП

Изучением размыва берегов на территории криолитозоны в значительной мере занимались отечественные исследователи, например Дебольский и др. [12]. В лаборатории динамики русловых процессов и ледотермики ИВП РАН для описания природы деструктивных криогенных береговых процессов и влияния этих процессов на экологию окружающей среды была разработана модель разрушения берегов северных водоемов под действием таких факторов, как повышение температуры окружающей среды, солнечная радиация и связанное с ней снеготаяние.

Коллектив авторов под руководством В.К. Дебольского в рамках исследований разрушения мерзлых берегов на склонах различной направленности [13; 14] предложил методику прогноза процесса термоэрозии с учетом воздействия естественных сезонных условий на многолетнемерзлые породы. Была исследована скорость оттаивания почв под

воздействием солнечной радиации с учетом направления берегового уклона, что показано экспериментально. Описано различие влияния ультрафиолетовых (УФ) и инфракрасных (ИК) лучей на снеготаяние, так как первые имеют способность проникать вглубь непрозрачных веществ и преобразовываться в тепловые потоки внутри снежной толщи, а вторые интенсивно воздействуют только на поверхности вещества (снега, льда). При этом облачность является задерживающим фактором только для ИК участка спектра. В солнечные дни даже в тени присутствует ультрафиолетовая составляющая солнечной радиации. В работах авторов приведены результаты экспериментов по исследованию действия ультрафиолетовой и инфракрасной составляющих на снежный покров. Очевидно, что разные склоны одновременно могут испытывать различные воздействия: склон, обращенный к солнцу, будет подвергаться практически фронтальному инфракрасному влиянию и, таким образом, протаивать гораздо быстрее. Через некоторое время, пропорциональное мощности солнечного излучения, он будет свободен от снега и уже размывает (так как интенсивно тающие снежные пласты генерируют довольно мощные талые потоки, которые деформируют склон), в то время как на противоположном склоне, теневом, еще будет лежать снег. При этом ультрафиолетовые лучи, для которых облачность не является задерживающим фактором, присутствуют даже в пасмурные дни и будут воздействовать на оба склона.

Исследование воздействия солнечной радиации на весенний размыв берегового уклона также отражено в [15], а влияние осадков в виде дождя — в [16]. Роль солнечной радиации в процессе разрушения мерзлых берегов рек ранее не была изучена, хотя резкое увеличение ее интенсивности в весенний период плюс сезонное повышение температуры воздуха вместе играют колоссальную роль в процессах таяния снега. В это время образуются мощные талые потоки воды, которые вызывают не только наводнения, но и служат причиной интенсивного смыва оттаявшего материала со склонов рек. Зачастую данные потоки бывают мощнее, чем сезонные ливни, поэтому пренебрегать этим явлением было бы неправильно. Практически процесс весеннего оттаивания происходит в течение нескольких суток, и весь снег толщиной до нескольких метров, накопившийся за зимний период, резко превращается в потоки воды, провоцируя интенсивные береговые процессы. В работе было

приведено исследование снеготаяния в зависимости от интенсивности солнечного излучения и угла падения солнечных лучей. Различная интенсивность снеготаяния генерирует соответствующие склоновые потоки, которые вызывают размыв и служат вторичным источником протаивания. Так как склоны в период снеготаяния оказываются в неравных условиях, то и разрушения их проходят по-разному. Теневой склон из-за наличия снега оказывается более заморожен, сцементирован. Его протаивание в связи с этим задерживается на многие недели.

Лабораторным исследованием транспорта наносов при движении потока в мерзлых породах занимались Ионов и Грицук [17; 18]. Было рассмотрено влияние волн с различными характеристиками на темпы береговой эрозии. Экспериментальные исследования динамики протаивания как надводной, так и подводной частей берегового склона при различных внешних и внутренних условиях, проведенные в гидравлической лаборатории, отражены в [19; 20].

3. Исследования ледовых процессов

Для решения проблем, связанных с использованием водных ресурсов поверхностных водных объектов, особенно в зимних условиях, в силу особенностей географического расположения Российской Федерации необходимо наличие возможно более полной информации о ледовых процессах в реках и водоемах, ведь большая часть из них значительный период года (иногда до 9 месяцев, например, Обская губа) покрыта льдом. Начальная стадия формирования ледяного покрова и его разрушение в период ледохода часто вызывают катастрофические подъемы уровней воды. На территории России в целом ряде регионов (Архангельская и Вологодская области, Якутия, Иркутская область и др.) зимние наводнения, спровоцированные ледовыми заторами, происходят ежегодно, а наносимый ими ущерб весьма ощутим не только для местных, но и для федерального бюджетов. Исследования ледовых процессов постоянно развиваются на базе Института водных проблем РАН. Были обобщены данные по ледовым затруднениям на территории Российской Федерации, разработаны методики прогнозирования возможных катастрофических ситуаций в зимний период, связанных с распространением загрязняющих веществ в водотоке при активных ледовых явлениях [21]. Особое внимание уделялось

измерениям на натуральных объектах гидродинамических характеристик подледных потоков, что явилось основой для параметризации турбулентности этих потоков и создания математических моделей взаимодействия потока с ледяным покровом.

При решении гидравлических или одномерных задач, в которых для описания открытых и подледных потоков необходимо наличие дополнительно сопротивления, можно получить изменение интегральных характеристик, таких как расходы или средние по сечению скорости и глубины потоков. Именно этот класс задач позволяет делать прогнозы о динамике ледяного покрова (его деформациях и возможных разрушениях), поскольку временные и пространственные масштабы механических изменений льда соответствуют масштабам изменения интегральных характеристик потока [22].

Зимние наводнения в условиях криолитозоны описаны в статьях Дебольской [23] и Масликовой [24]. В целях изучения природы деструктивных криогенных береговых процессов и влияния этих процессов на экологию окружающей среды лабораторией динамики русловых процессов и ледотермики разработана модель разрушения берегов северных водоемов под действием таких факторов, как повышение температуры окружающей среды, солнечная радиация и связанное с ней снеготаяние. Основой математической модели послужили данные лабораторных экспериментов [16]. Существенной особенностью формирования поверхностного стока, ответственного за переформирование русла в условиях криолитозоны и в период сезонных изменений температур, является тот факт, что в почве присутствуют потоки воды, образованные при оттаивании мерзлой породы. В связи с этим гидравлическая проводимость почвы изменяется. В процессе работы были получены важные выводы о том, что русло реки в условиях криолитозоны можно моделировать как трехслойную систему — сезонноталый слой, ММП и талик. Для каждого слоя могут быть записаны соответствующие системы уравнений термо- и гидродинамики, адекватно отражающие состояние изменения грунта и внешних условий. Наиболее сильно размывается верхний, сезонноталый слой, что объясняется большей рыхлостью и подвижностью его грунта, который подвергается воздействию не только максимальных скоростей потока на поверхности, но и влиянию внутрисклоновых, фильтрационных и дождевых потоков. Слой ММП за счет его высокой цементности разрушается гораздо медленнее, для

него характерны другие временные интервалы (десятки и сотни лет). Слой талика часто не размывается из-за небольших придонных скоростей. Предложена система уравнений, описывающая движение породы по склонам в условиях криолитозоны с учетом интенсивности дождя и изменяющейся во времени льдистости грунта [16; 25]. При неразмывающих скоростях потока деформации склона обусловлены исключительно проседанием оттаявшего грунта и его выдвиганием к центру потока [15].

Развивая дальше эту тему, в [25] отмечено, что отклик многолетней мерзлоты на изменение климата существенно зависит от исходного термического состояния многолетнемерзлых пород и местного разнообразия ландшафтов. При потеплении климата начинается таяние верхнего льдистого горизонта многолетнемерзлых пород, в связи с чем активизируются деструктивные криогенные процессы: термокарст, термоэрозия, термоабразия, солифлюкция. Предложена математическая модель динамики берегового склона при различных внешних факторах, включающих изменения физических свойств мерзлого грунта, льда и снега от температуры во времени.

В работе Дебольской [26] представлена математическая модель деформаций русла рек в районах вечной мерзлоты. Деформации вызваны влиянием волн различного происхождения при увеличении температуры окружающей среды. Модельная система состоит из нестационарного гидродинамического модуля, теплового модуля и модуля деформации слоя. Гидродинамический модуль основан на двумерных уравнениях мелкой воды.

4. Особенности распространения примеси в деформируемых руслах рек криолитозоны

Речной сток является одним из основных источников поступления растворенных веществ в моря, поэтому проблема выноса реками органических соединений с каждым годом становится все более актуальной. В литературе в последнее время широко обсуждается отмечаемое увеличение количества органики в Северном Ледовитом океане, причиной которого может быть таяние вечной мерзлоты в Сибири и рост выноса органических веществ реками. Также на берегах рек традиционно располагаются населенные пункты и объекты промышленного назначения, являющиеся источниками загрязнения окружающей среды, но в случае криолитозоны от-

ходы и продукты деятельности годами накапливались и существовали в мерзлом состоянии. При потеплении климата и оттаивании мерзлоты возрастает опасность, помимо разрушения берегов, поступления токсичных веществ из мест захоронения промышленных, бытовых, химических и радиоактивных отходов в речные воды и их дальнейшего распространения в океане.

Построение математических моделей должно стать главным инструментом не только для прогноза русловых процессов в условиях криолитозоны, но и для углубленного исследования многочисленных взаимосвязей, которые необходимо учитывать при этом. В лаборатории ИВП РАН разработаны математические модели, объединяющие процессы переноса примеси, русловые деформации и различные виды таяния берегового склона [23] в условиях нестационарности водного потока. Модели могут быть использованы для прогнозирования распространения и накопления загрязнений в реках криолитозоны, берега которых подвергаются термоэрозии. Для валидации моделей проведены лабораторные эксперименты по распространению примеси в гидравлическом лотке с полностью замороженным склоном (гомогенная модель) и с ледяными включениями (гетерогенная модель). Получены зависимости начала таяния берегового склона от его начальной температуры при разных температурах водного потока, подтвержденные данными лабораторного эксперимента. В результате проведения лабораторных и численных экспериментов сделаны новые, практически важные выводы об особенностях распространения примесей в деформируемых и недеформируемых руслах. Показано влияние формы поперечного сечения деформируемого русла на распространение примеси. Выдвинуто предположение, что существует такая форма сечения, при которой его деформации приводят к более интенсивному переносу примеси, чем в недеформируемом потоке. Подробно исследовано влияние расположения источника загрязнения в потоке на распространение примеси. Проведена оценка вклада различных частей потока в перенос примеси. Исследование воздействия термической и механической эрозии, вызванной таянием ледяных пластов, включенных в береговой откос, на распространение примеси позволило сделать вывод о том, что в результате формирования таликов, заполняемых потоком, переносящим примесь, условия равномерности потока нарушаются, приводя к нестационарности распространения примеси. При

этом увеличение объема исследуемого участка за счет появления полостей в береговом откосе приводит к увеличению концентрации примеси.

Заключение

На данный момент тема разрушения берегов криолитозоны изучена не в полной мере и требует дальнейшего внимания. Разными исследователями был разработан комплекс математических моделей: одномерная и двухмерная модели взаимодействия волны попуска с ледяным покровом; модель образования затора торошения и подъема заторного уровня; модели деформаций дна аллювиального потока под действием волн попусков при регулировании стока и в условиях заторообразования. Созданы оригинальные методики: расчета взаимодействия длинноволновых возмущений с ледяным покровом; прогнозирования разрушения ледяного покрова, возникновения заторов; расчета подъемов заторных уровней и скорости затопления поймы; расчета переноса примеси в стационарных и приливных потоках. Проведены лабораторные эксперименты для изучения воздействия гидравлических нагрузок на русла, сложенные многолетнемерзлыми породами, в гидравлическом лотке с размываемым дном, с использованием частично замороженного грунта и пластин льда, внедренных в береговой откос. Разработана математическая модель деформаций русел, сложенных многолетнемерзлыми породами, под воздействием волн попуска и наводнений, вызванных ледовыми затруднениями. Полученные при проведении лабораторных экспериментов и на основании математического моделирования результаты и выводы об особенностях деформации русел, сложенных многолетнемерзлыми грунтами, являются актуальными. Анализ результатов математического и лабораторного моделирования показал, что русловые деформации рек, протекающих в криолитозоне, значительно отличаются от деформаций русел, сложенных грунтами, не подверженными влиянию фазового перехода «вода — лед», и могут наблюдаться даже при неразмывающих скоростях водного потока, причиной чего является нестабильность мерзлоты как твердого вещества.

Список литературы

- [1] *De Koven Leffingwell E.* The Canning River region, northern Alaska // U.S. Geol. Survey Prof. Paper. 1919. No. 109. 251 p.
- [2] *Cooper R.H., Hollingshead A.B.* River bank erosion in regions of permafrost // *Fluvial processes and sedimentation: Proc. Hydrology Symposium, Univ. of Alberta, Edmonton.* 1973. No. 9. Pp. 272–283.
- [3] *McDonald B.C., Lewis C.P.* Geomorphical and sedimentologic processes of rivers and coast, Yukon coastal plain: Environmental-Social Comm. Northern Pipelines, Task Force on Northern Oil Devel., Rept. 1973. No. 73–79. 245 p.
- [4] *Kane D.L., Slaughter C.W.* Seasonal regime and hydrological significance of stream icings in central Alaska // *The role of snow and ice in hydrology: Proc. Banff Symposia, Sept. 1972, Internat. Assoc. Sci. Hydrology Publ.* 1972. Vol. 1. Pp. 528–540.
- [5] *Walker H.J., Arnborg L.* Permafrost and ice-wedge effects on riverbank erosion // *Permafrost: Internat. Conf., Lafayette, Indiana, Proc., Natl. Research Council Publ.* 1966. No. 1287. Pp. 164–171.
- [6] *Ritchie W., Walker H.J.* Riverbank forms of the Colville River delta // *Reed J.C.Jr., Sater J.E. (eds.). The coast and shelf of the Beaufort Sea. Arctic Inst. North America.* 1974, Pp. 545–562.
- [7] *Walker H.J.* Morphology of the North Slope // *Britton M.E. (ed.). Alaskan arctic tundra. Tech. Paper 25. Arctic Inst. North America.* 1973. Pp. 49–92.
- [8] *Bvidel J.* Typen der Talbildung in verschiedenen klimamorphologischen Zonen // *Zeitschr. Geomorph., Suppl.* 1972. Bd. 14. Pp. 1–20.
- [9] *Outhet D.N.* Progress report on bank erosion studies in the Mackenzie River delta, N.W.T. // *Hydrologic aspects of northern pipeline development, 1974. Environmental-Social Comm. Northern Pipelines, Task Force on Northern Oil Devel., Rept.* 1974. No. 74–12. Pp. 297–345.
- [10] *Miles M.* An investigation of riverbank and coastal erosion, Banks Island, District of Franklin // *Geol. Survey Canada Paper* 76-1A. 1976. 76-1A. Pp. 195–200.
- [11] *Абрамов P.B.* Ниши вытаявания // *Природа.* 1957. Т. 46. № 7. С. 112–113.
- [12] *Дебольский В.К., Дебольская Е.И., Долгополова Е.Н., Масликова О.Я., Грицук И.И., Ионов Д.Н.* Проблемы и современные исследования гидродинамики и ледотермики русловых потоков // *Избранные труды Института водных проблем РАН 1967–2017.* Т. 2. М.: КУРС, 2017. С. 101–124.
- [13] *Дебольский В.К., Грицук И.И., Ионов Д.Н., Масликова О.Я.* Размытие мерзлых берегов северных рек в зависимости от направления берегового уклона // *Вестник МГСУ.* 2018. Т. 13. Вып. 9. С. 1112–1124. doi: 10.22227/1997-0935
- [14] *Дебольская Е.И., Дебольский В.К., Масликова О.Я., Грицук И.И., Ионов Д.Н.* Моделирование деформаций русел, сложенных мерзлыми породами, при повышении температуры окружающей среды // *Лед и снег.* 2013. № 1 (121). С. 104–110.
- [15] *Масликова О.Я.* Экспериментальное исследование интенсивности снеготаяния на лабораторной модели // *Природообустройство.* 2016. № 1. С. 28–33.
- [16] *Грицук И.И., Дебольская Е.И., Дебольский В.К., Масликова О.Я., Пономарев Н.К.* Влияние осадков в виде дождя на деформации берегового склона русел рек в условиях многолетнемерзлых пород // *Лед и снег.* 2012. № 3 (119). С. 73–78.
- [17] *Ионов Д.Н., Грицук И.И.* Исследование транспорта наносов как результата деформации берегового склона,

- включающего мерзлый грунт, на лабораторной модели // *Природообустройство*. 2016. № 4. С. 32–38.
- [18] Грицук И.И., Ионов Д.Н., Дебольский В.К., Масликова О.Я. Лабораторное исследование деформаций в нижнем бьефе на примере Рыбинского гидроузла // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2017. № 1. С. 70–78.
- [19] Дебольский В.К., Масликова О.Я., Ионов Д.Н., Грицук И.И., Джумагулова Н.Т. Лабораторное исследование влияния потока на протаивание подводного склона и темпы береговой эрозии в условиях криолитозоны // *Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования*. 2017. № 2. С. 182–192.
- [20] Котляков А.В., Грицук И.И., Масликова О.Я., Пономарев Н.К. Экспериментальное исследование влияния льдистости грунтов, слагающих русло рек, на динамику берегового склона // *Лед и снег*. 2011. № 2 (114). С. 92–98.
- [21] Дебольский В.К., Дебольская Е.И., Котляков А.В., Дербенев М.В., Замятина Э.В. Современная пространственно-временная изменчивость ледовых явлений в устьевых областях рек российской Западной Арктики // *Известия РАН. Серия географическая*. 2008. № 2. С. 36–42.
- [22] Дебольская Е.И. Динамика водных покровов под ледяным покровом. М.: Изд-во ИВП РАН; Изд-во МГУП, 2003. 279 с.
- [23] Debol'skaya E.I., Gritsuk I.I., Debol'skii V.K., Ionov D.N., Maslikova O.Ya. Effect of Bank Deformations on Pollutant Transport in Rivers in Cryolithozone: Laboratory and Mathematical Modeling // *Water Resources*. 2018. Vol. 45 (2). No. 4. Pp. 542–552. doi: 10.1134/S0097807818040073
- [24] Масликова О.Я. Зимние наводнения в условиях криолитозоны, вызванные ледовыми явлениями на реках // *Природообустройство*. 2013. № 2. С. 60–65.
- [25] Масликова О.Я., Козлов Д.В. Влияние зимних и весенних условий на размыв рек в криолитозоне // *Природообустройство*. 2014. № 1. С. 54–59.
- [26] Debol'skaya E.I. A model of river bank deformations under the simultaneous effect of waves from a hydropower plant and warming // *Evolving Water Resources Systems: Understanding, Predicting and Managing Water — Society Interactions: Proceedings of ICWRS-2014, Bologna, Italy, June 2014*. IAHS Publ., 2014.

Для цитирования:

Синиченко Е.К., Рекач Ф.В., Шамбина С.Л. Актуальное состояние исследований проблем разрушения берегов водных объектов криолитозоны // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2019. Т. 20. № 1. С. 48–56. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-48-56

Research paper

Current state of knowledge on the problem of water objects' frozen watersides destruction

Evgeniy K. Sinichenko*, Fedor V. Rekach†, Svetlana L. Shambina‡

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation

Article history:

Received: January 14, 2019

Revised: February 11, 2019

Accepted: February 27, 2019

Keywords:

analysis of works;
coastal deformation;
cryolithozone;
laboratory experiments;
permafrost

Due to the fact that the vast territory of Russia is located in the zone of permafrost, there is an urgent need to study coastal erosion, taking place not only during the construction cycle, but also during the subsequent operation of commissioned facilities, in particular hydrotechnical ones. The analysis of recent papers of foreign and domestic researchers who work in the field of knowledge of water objects' frozen coasts destruction was made. The influence of the energy of a moving water flow on the reformation of the coastal slope and on the stability of river channels as a whole was considered. Analysis of the results of mathematical and laboratory modeling showed that the channel deformations of the rivers flowing in the cryolithozone differ significantly from the deformations of the channels laid in soils which are not affected by the water-ice phase transition. The causes of the erosion of the frozen shores in the under permafrost conditions are not only mechanical, but also thermic components during the movement of water, which indicates the instability of the permafrost as a solid. All this should be considered when designing hydraulic engineering objects.

* Associate Professor of Department of Construction, Engineering Academy, Candidate of Technical Sciences; sinichenko_ek@rudn.ru

† Associate Professor of Department of Construction, Engineering Academy, Candidate of Technical Science

‡ Associate Professor of Department of Construction, Engineering Academy, Candidate of Technical Sciences

References

- [1] De Koven Leffingwell E. The Canning River region, northern Alaska. *U.S. Geol. Survey Prof. Paper*. 1919;(109).
- [2] Cooper RH, Hollingshead AB. River bank erosion in regions of permafrost. *Fluvial processes and sedimentation: Proc. Hydrology Symposium, Univ. of Alberta, Edmonton*. 1973;(9): 272–283.
- [3] McDonald BC, Lewis CP. *Geomorphical and sedimentologic processes of rivers and coast, Yukon coastal plain: Environmental-Social Comm. Northern Pipelines, Task Force on Northern Oil Devel., Rept.* 1973;(73–79).
- [4] Kane DL, Slaughter CW. Seasonal regime and hydrological significance of stream icings in central Alaska. *The role of snow and ice in hydrology: Proc. Banff Symposia, Sept.* 1972. 1972;(1): 528–540.
- [5] Walker HJ, Arnborg L. Permafrost and ice-wedge effects on riverbank erosion. *Permafrost: Internat. Conf., Lafayette, Indiana, Proc.* 1966;(1287): 164–171.
- [6] Ritchie W, Walker HJ. Riverbank forms of the Colville River delta. In: Reed JC Jr., Sater JE (eds.). *The coast and shelf of the Beaufort Sea: Arctic Inst. North America*. 1974: 545–562.
- [7] Walker HJ. Morphology of the North Slope. In: Britton ME (ed.). *Alaskan arctic tundra: Arctic Inst. North America Tech. Paper 25*. 1973: 49–92.
- [8] Bvidel J. Typen der Talbildung in verschiedenen klimamorphologischen Zonen. *Zeitschr. Geomorph., Suppl.* 1972;14: 1–20.
- [9] Outhet DN. Progress report on bank erosion studies in the Mackenzie River delta, N.W.T. *Hydrologic aspects of northern pipeline development, 1974: Environmental-Social Comm. Northern Pipelines, Task Force on Northern Oil Devel., Rept.* 1974;(74–12): 297–345.
- [10] Miles M. An investigation of riverbank and coastal erosion, Banks Island, District of Franklin. *Geol. Survey Canada Paper 76-1A*. 1976: 195–200.
- [11] Abramov RV. Nishi vytaivaniya [Thaw-out niches]. *Priroda*. 1957;46(7): 112–113.
- [12] Debolskiy V.K., Debolskaya Ye.I., Dolgopolova Ye.N., Maslikova O.Ya., Gritsuk I.I., Ionov D.N. Problemy i sovremennye issledovaniya gidrodinamiki i ledotermiki ruslovykh potokov [Problems and modern studies of hydrodynamics and ice-thermals of channel flows]. *Izbrannyye trudy Instituta vodnykh problem RAN 1967–2017*. Vol. 2. Moscow: KURS Publ.; 2017. p. 101–124.
- [13] Debolskiy VK, Gritsuk II, Ionov DN, Maslikova OYa. Razmytie merzlykh beregov severnykh rek v zavisimosti ot napravleniya beregovogo uklona [Blurring the frozen banks of the northern rivers depending on the direction of the coastal slope]. *Vestnik MGSU*. 2018;13(9): 1112–1124. doi: 10.22227/1997-0935
- [14] Debolskaya YeI, Debolskiy VK, Maslikova OYa, Gritsuk II, Ionov DN. Modelirovanie deformatsiy rusel, slozhennykh merzlymi porodami, pri povyshenii temperatury okruzhayushchey sredy [Modeling deformations of channels formed by frozen rocks with increasing ambient temperature]. *Led i sneg [Ice and Snow]*. 2013;1(121): 104–110. (In Russ.)
- [15] Maslikova OYa. Eksperimentalnoe issledovanie intensivnosti snegotayaniya na laboratornoy modeli [Experimental study of the intensity of snow melting in a laboratory model]. *Prirodoobustroystvo [Environmental engineering]*. 2016;(1): 28–33. (In Russ.)
- [16] Gritsuk II, Debolskaya YeI, Debolskiy VK, Maslikova OYa, Ponomarev NK. Vliyaniye osadkov v vide dozhdya na deformatsii beregovogo sklona rusel rek v usloviyakh mnogoletnemerzlykh porod [The effect of precipitation in the form of rain on the deformation of the coastal slope of the river beds in permafrost conditions]. *Led i sneg [Ice and Snow]*. 2012;3(119): 73–78. (In Russ.)
- [17] Ionov DN, Gritsuk II. Issledovanie transporta nanosov kak rezultata deformatsii beregovogo sklona, vklyuchayushchego merzlyy grunt, na laboratornoy modeli [Investigation of sediment transport as a result of deformation of the coastal slope, including frozen soil, on a laboratory model]. *Prirodoobustroystvo [Environmental engineering]*. 2016;(4): 32–38. (In Russ.)
- [18] Gritsuk II, Ionov DN, Debolskiy VK, Maslikova OYa. Laboratornoe issledovanie deformatsiy v nizhnem befe na primere Rybinskogo gidrouzla [Laboratory investigation of deformations in the downstream by the example of the Rybinsk hydroelectric complex]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstrukttsii i sooruzhenii [Structural mechanics of engineering constructions and buildings]*. 2017;(1): 70–78. (In Russ.)
- [19] Debolskiy VK, Maslikova OYa, Ionov DN, Gritsuk II, Dzhumagulova NT. Laboratornoe issledovanie vliyaniya potoka na protaivaniye podvodnogo sklona i tempy beregovoy erozii v usloviyakh kriolitozony [Laboratory study of the effect of flow on the thawing of the submerged slope and the rate of coastal erosion under cryolithozone conditions]. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2017;(2): 182–192. (In Russ.)
- [20] Kotlyakov AV, Gritsuk II, Maslikova OYa, Ponomarev NK. Eksperimentalnoe issledovanie vliyaniya ldistosti gruntov, slagayushchikh ruslo rek, na dinamiku beregovogo sklona [Experimental study of the effect of ice content in the soils that form the river bed on the dynamics of the coastal slope]. *Led i sneg [Ice and Snow]*. 2011;2(114): 92–98. (In Russ.)
- [21] Debolskiy VK, Debolskaya YeI, Kotlyakov AV, Derbenev MV, Zamyatina EV. Sovremennaya prostranstvenno-vremennaya izmenchivost ledovykh yavleniy v ustevykh oblastiakh rek rossiyskoy Zapadnoy Arktiki [Modern spatial-temporal variability of ice phenomena in the estuarine regions of the rivers of the Russian Western Arctic News of the Russian Academy of Sciences]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*. 2008;(2): 36–42. (In Russ.)
- [22] Debolskaya YeI. Dinamika vodnykh pokrovov pod ledyanym pokrovom [Dynamics of water under the ice cover]. Moscow: IVP RAN Publ.; MGUP Publ., 2003. (In Russ.)
- [23] Debol'skaya EI, Gritsuk II, Debol'skii VK, Ionov DN, Maslikova OYa. Effect of Bank Deformations on Pollutant Transport in Rivers in Cryolithozone: Laboratory and Mathematical Modeling. *Water Resources*. 2018;45–2(4): 542–552. doi: 10.1134/S0097807818040073
- [24] Maslikova OYa. Zimnie navodneniya v usloviyakh kriolitozony, vyzvannyye ledovymi yavleniyami na rekakh [Winter floods in the conditions of cryolithozone caused by ice phenomena on the rivers]. *Prirodoobustroystvo*. 2013;(2): 60–65. (In Russ.)

- [25] Maslikova OYa, Kozlov DV. Vliyanie zimnikh i vesennikh usloviy na razmyv rek v kriolitozone [Impact of winter and spring conditions on river erosion in the cryolithozone]. *Prirodoobustroystvo*. 2014;(1): 54–59. (In Russ.)
- [26] Debol'skaya EI. A model of river bank deformations under the simultaneous effect of waves from a hydropower plant and warming. *Evolving Water Resources Systems: Understanding, Predicting and Managing Water — Society*

Interactions: Proceedings of ICWRS-2014, Bologna, Italy, June 2014. IAHS Publ.; 2014.

For citation:

Sinichenko EK, Rekach FV, Shambina SL. Current state of knowledge on the problem of water objects' frozen watersides destruction. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(1): 48–56. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-48-56 (In Russ.)



Научная статья

DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-57-65

УДК 551.248.2:550.348(55)

Литологические особенности стратиграфии и тектонического районирования сейсмически активного Загросского краевого прогиба в пределах акватории Персидского залива

В.Ю. Абрамов*, Х. Алджабасини†

Российский университет дружбы народов, *Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6*

История статьи:

Поступила: 21 января 2019

Доработана: 21 февраля 2019

Принята: 25 февраля 2019

Ключевые слова:

геология;
тектоника;
сейсмология;
землетрясение;
Персидский залив

В статье рассматриваются некоторые особенности стратиграфии и основные черты тектонической характеристики Загросского (Месопотамского) краевого прогиба как сейсмически активного и нефтегазоносного объекта. Стратиграфия в пределах всего Предзагросского краевого прогиба, несмотря на его протяженность, в различных частях схожа между собой, основные отличия связаны с тектоническим строением. На формирование складок основное влияние оказывали тектонические движения во время формирования альпийской складчатости. Значительный объем работ выполнен на основе комплексного анализа каталогов землетрясений NEIC (The National Earthquake Information Center), сформированных Национальной геологической службой США (The United States Geological Survey). Представления о строении рассматриваемого региона проведены на основе изучения литературных источников, а также комплексирования данных предыдущих авторских исследований. Сопоставление данных по землетрясениям, произошедшим в период 2005—2017 гг., и реконструкция тектонического развития рассматриваемого региона помогли установить связи между землетрясениями и тектонически активными зонами и в итоге определить сейсмическую опасность различных участков акватории Персидского залива. В работе обозначены основные тектонические причины возникновения землетрясений. Это коллизионное столкновение плит и различных тектонических блоков, глубинные структурные, фазовые и вещественные преобразования, обусловленные влиянием на литосферу потоков активной астеносферы, а также структурные трансформации, связанные с отсложкой осадочного чехла и верхней части земной коры. Исследование имеет прикладное значение для прогнозирования будущих природных явлений и положения их очагов, а также при определении причин уже произошедших событий.

* Доцент департамента недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, к.г.-м.н., доцент; geophy-rudn@mail.ru

† Аспирант департамент недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия

© Абрамов В.Ю., Алджабасини Х., 2019



Введение

В общем виде облик Персидского залива сформировался более 30 млн лет назад в результате давления Африки на Европу (возникновение Альп), а также столкновения Индии и Азии (возникновение Гималаев).

Нефтегазоносный бассейн Персидского залива приурочен к крупной асимметричной впадине (Предзагросский прогиб). Ее формирование произошло в процессе длительного погружения в области соединения Африкано-Аравийской платформы с Альпийско-Гималайским горно-складчатый поясом. Изучение геологического строения, обстановок осадконакопления и оценка потенциала нефтегазоносности Персидского залива являются актуальными задачами на сегодняшний день. Понимание природы сейсмической активности и прогноз сейсмических событий позволит минимизировать затраты при разработке месторождений нефти и газа, а также облегчит поисковое и разведочное бурение.

Добыча нефти в пределах акватории Персидского залива составляет около 15 % от мировой, доказанные запасы нефти превышают 30 % разведанных мировых запасов. Это один из богатейших и перспективных в плане своего потенциала нефтегазоносных бассейнов на Земле. Залежи нефти в пределах рассматриваемой территории приурочены к крупным складкам, сложенным породами мела — нижнего олигоцена, перекрытым сильно дислоцированными отложениями плиоцена — нижнего миоцена (месторождения Ага-Джари, Пазанан, Киркук, Гечсаран, Джамбур, Бай-Хасан и др.). На формирование складок значительное влияние оказывали тектонические движения во время формирования альпийской складчатости [1]. В пределах акватории Персидского залива насчитывается порядка 25 месторождений, относящихся к гигантским или уникальным по своим запасам (Науруз, Сальман, Духан, Ферейдун, Сирри и т.д.).

В статье представлены некоторые особенности стратиграфии и тектонического районирования акватории Персидского залива, а также дана краткая модель геологической истории развития региона. Модель геологического развития региона необходимо разрабатывать и уточнять с целью выявления пространственно-временных закономерностей тех или иных природных явлений для решения прикладных задач в строительстве, в целях более эффективной разработки и эксплуатации нефтяных

и газовых месторождений, а также в целях минимизации экономических потерь в случае возникновения природных катастрофических явлений (землетрясения, цунами, наводнения и т.д.).

Выявление особенностей геологического строения и тектонического развития акватории Персидского залива имеет практическое значение для установления закономерностей сейсмичности региона и его нефтегазоносности и заключается в комплексном подходе к анализу имеющихся инструментальных замеров и концептуальных данных в интересах нефтяной и строительной промышленности [2]. На примере выявления особенностей стратиграфии и тектонического развития в пределах акватории Персидского залива показана связь фундаментальной науки и производственных задач.

1. Стратиграфическая характеристика разреза

Осадочный чехол акватории Персидского залива представлен широким спектром толщ. По возрасту разрез представлен толщами от древних венд-кембрийских до отложений четвертичного возраста. Максимальная толщина чехла зафиксирована в наиболее погруженной части прогиба на уровне 10—12 км. На пологом склоне Аравийской плиты в районах, примыкающих к Аравийско-Нубийскому щиту, толщина чехла уменьшается до сотен метров. Осадочный чехол представлен 7 формациями палеозоя, 18 — мезозоя и 12 — кайнозоя (рис. 1).

Породы фундамента в регионе встречаются в горном массиве Сенедей-Сиран. По литологическому составу фундамент представлен метаморфизованными осадочными разностями, гранитоидный массив, по возрасту это архей-протерозой.

Палеозойский разрез представлен отложениями кембрия, ордовика и пермскими отложениями. В его основании залегают эвапориты формации Хормус. Отложения кембрия и ордовика по составу песчано-глинистые, общая толщина их более 3000 м. Пермские отложения залегают со стратиграфическим несогласием на ордовикской толще: здесь преобладают карбонатные породы. Толщина пермских отложений превышает 500 м, составляя в среднем около 800—1000 м. В палеозойском разрезе отсутствуют отложения силура, девона и карбона (для последних характерно локальное распространение).

Верхняя часть разреза детальнее изучена, в том числе бурением, так как здесь сосредоточено боль-

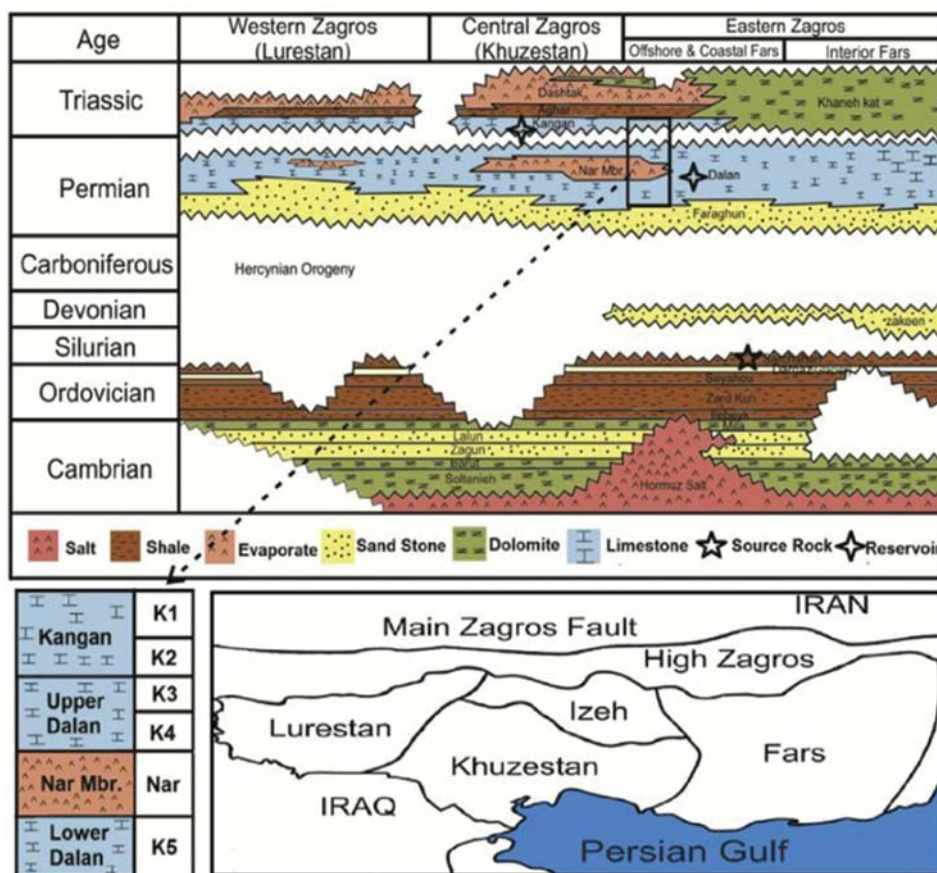


Рис. 1. Региональная стратиграфическая схема
 [Figure 1. Regional stratigraphic scheme]

ше запасов нефти, чем в нижележащих пластах. Эта часть разреза представлена кайнозойскими отложениями неогена, палеогена и мезозойскими отложениями мела, триаса и юры. Мезозойские, палеогеновые и миоценовые отложения имеют в своем составе существенную карбонатную составляющую (известняки, доломиты, мергели). В неоген-четвертичных отложениях преобладают песчаные разности. Среди песчаников выделяется еще одна мощная эвапоритовая толща средне-миоценового возраста. Толщина соленосной толщи свыше 1300 м. По скважинным данным установлено, что в отложениях других возрастов также присутствуют солевые формации, они служат покрышками нефтеносных пластов. С солевыми горизонтами связаны уровни срывов литоформационных пластин, что привело к возникновению надвигов наподобие «чешуй» (верхнетриасовая формация Даштак, верхнеюрские — Хитх и Готния, миоцен-плиоценовая — Гачсаран). Уровни соленосных горизонтов сыграли значительную роль в формировании современных тектонических структур, что повлияло на сейсмичность в районе акватории Пер-

сидского залива. Таким образом, можно установить следующую закономерность. Нефтеносность продуктивных пластов связана напрямую с распространением соленосных горизонтов. В свою очередь, соленосные пласты оказывали влияние на становление текущей тектонической обстановки в пределах акватории Персидского залива, в том числе на современные тектонические движения, а значит, напрямую связаны с сейсмичностью территории.

Стратиграфия в пределах всего Предзагорского краевого прогиба, несмотря на его протяженность, в различных частях схожа между собой, отличаясь только мощностью тех или иных пластов. Основные отличия связаны с тектоническим развитием района.

2. Тектоническая характеристика изучаемой территории

Основными тектоническими элементами акватории Персидского залива являются склон Нубийско-Аравийского щита — на западе, а также область альпийской складчатости — на севере и северо-вос-

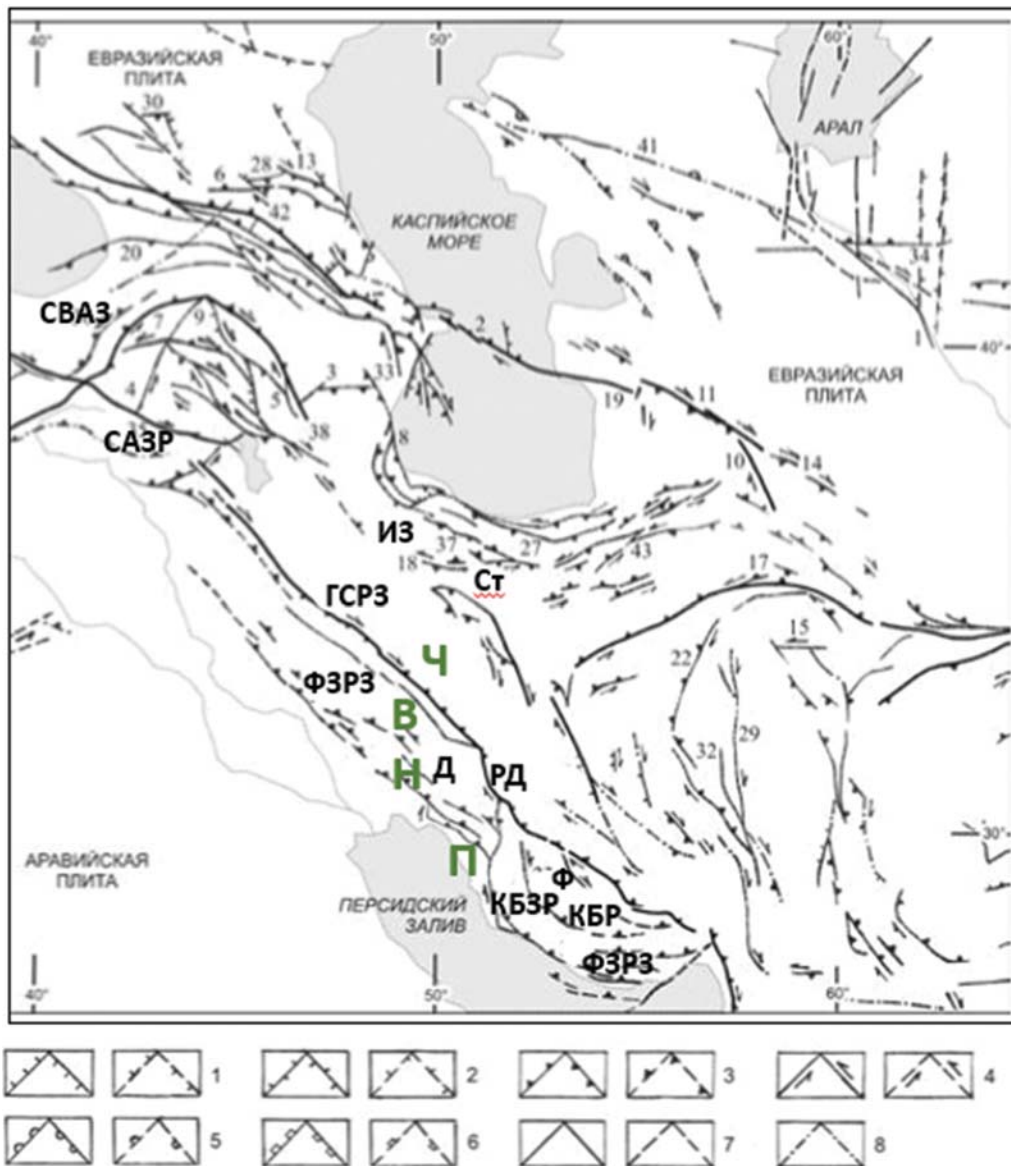


Рис. 2. Активные разломы в пределах Аравийско-Иранского сегмента:

СВАЗ — Северо-Восточная Анатолийская зона разломов; САЗР — Северо-Анатолийская зона разломов; ГСРЗ — Главный современный разлом Загроса (правый сдвиг); ФЗРЗ — фронтальная зона разлома Загроса; РД — разлом Дена (правый сдвиг и надвигание); КБЗР — Казерун-Борзджанская зона разломов (правый сдвиг); КБР — разлом Карех-Бас (правый сдвиг); ИЗ — Ипакская зона; Ст — Северо-Тегеранский разлом; Д — провинция Дезфул; Ф — провинция Фарс; Ч — Чешуйчатая зона деформации; В — зона деформации Высокий Загрос; Н — зона деформации Низкий Загрос; П — Предгорная зона деформации; 1 — сбросы; 2 — раздвиги; 3 — надвиги и взбросы; 4 — сдвиги; 5 — флексуры; 6 — продолжение зон субдукции; 7 — разломы с неопределенным типом смещения; 8 — разломы, активные в среднем плейстоцене

[Figure 2. Active faults within the Arabian-Iranian segment:

СВАЗ — North-East Anatolian fault zone; САЗР — North Anatolian fault zone strikes; ГСРЗ — The Main modern Zagros fault (right shift); ФЗРЗ — front fault zone Zagros; РД — Den fault (right shift and thrust); КБЗР — Kazerun-Burzjansky the fault zone (right shift); КБР — Kareh-Bassa fault (right shift); ИЗ — Ipak zone; Ст — North Tehran fault; Д — Dezful province; Ф — Fars province; Ч — Scaly deformation zone; В — High Zagros deformation zone; Н — Low Zagros deformation zone; П — Piedmont deformation zone; 1 — discharges; 2 — expansions; 3 — thrusts and reverse faults; 4 — shifts; 5 — flexures; 6 — subduction zones; 7 — faults with an uncertain type of displacement; 8 — faults active in the middle Pleistocene

токе, Тавр в Турции и Загрос в Иране (рис. 2). Перед горной системой Загроса расположен Предзагорский (Месопотамский) краевой прогиб [3]. На остальной территории определяется Аравийская плита. Древний фундамент погружается полого на платформенном склоне бассейна от 1,0—1,5 до

4,5 км, в краевом Месопотамском прогибе происходит его резкое углубление до 10—14 км.

Предзагорский краевой прогиб формировался перед горными складчатыми сооружениями Загроса. Формирование происходило после закрытия мезозойского океана Тетис, история которого ох-

ватывает значительный промежуток времени (от триаса до палеогена). Ключевым источником сноса терригенного материала в прогибе являлся растущий горный массив Загроса. Сильнейшим активным сжатиям подвергались толщи пород осадочного чехла. При сжатиях происходило формирование крупных антиклинальных структур, вытянутых вдоль главной оси прогиба.

Главный современный разлом Загроса имеет юго-восточное простирание и характеризуется правым направлением сдвига. Это взброс глубокого заложения, расколовший единую докембрийскую платформу на Аравийский и Иранский сегменты. Основным юго-восточным продолжением Загросского разлома является разлом Дена, который сначала простирается на юг, характеризуясь преимущественно правосдвиговыми смещениями, а затем отгибается на северо-восток, где вдоль его ветвей начинает преобладать надвигание, сопряженное со складчатостью. Казерун-Боразджанская и Карехбасская разломные зоны ответвляются на юг от разлома Дена. Здесь также преобладает правосдвиговая компонента. Первая разломная зона характеризуется скоростью сдвига $\sim 4\text{—}6$ мм/год. Скорость уменьшается к югу по мере того, как от разломной зоны ответвляются на юго-восток складчато-надвиговые структуры Загроса. Вторая зона, Карехбасская, в северной части является сдвигом меридионального направления. Южнее она переходит во флексурно-надвиговую структуру, имеет юго-восточное простирание с поднятым северо-восточным крылом. Северо-западные разломы, следующие вдоль границы Аравийской плиты, характеризуются смещениями правого сдвига. Параллельные этому сдвигу в складчатом поясе Загроса развиваются структуры складчато-надвигового характера. Для четвертичного периода характерно поперечное укорочение складчатого пояса. Оно подсчитано суммированием надвиговых смещений. Скорость укорочения достигает нескольких миллиметров в год.

На востоке и северо-востоке рассматриваемой территории выявлены смещения левого сдвига, превосходящие взбросовые элементы. Это Ипакская зона разломов протяженностью около 100—120 км. Скорость сдвига — $0,5\text{—}1,5$ мм/год. Она определена по смещению конуса выноса в начале позднплейстоценового времени. Стоит отметить, что это значительно меньше, чем в зоне разломов Загроса, где средние скорости доходят до $5\text{—}6$ мм/год. К северо-востоку рассматриваемого района скорость тектонических движений уменьшается,

что отражается и на сейсмичности региона: к востоку она также ослабевает.

В зоне Главного Загросского надвига имеются нарушенные и деформированные следы субдукции Неотетиса, его остатки. Здесь сохранился реликтовый бассейн. При сокращении остаточного прогиба Неотетиса разные области плиты достигли Главного надвига в различное время. В зоне Главного Загросского надвига имеются нарушенные и деформированные следы субдукции Неотетиса, его остатки. На юго-востоке различаются северо-западный сегмент Дезфул с континентальной корой и юго-восточный сегмент Фарс. В районе Фарс кора более тонкая и, скорее всего, близка к океанической. Оба сегмента имеют складчато-надвиговую структуру, направленную на юго-запад. По характеру деформаций с северо-востока на юго-запад выделены четыре зоны: Чешуйчатая, Высокого Загроса, Низкого Загроса и Предгорная. Они различаются между собой по степени и времени деформаций. Наибольшая степень деформаций характерна для Чешуйчатой зоны, одновременно с этим ее деформация происходила позднее остальных. Образование рельефа в Чешуйчатой зоне началось в среднем позднем миоцене, после начала коллизии, и продолжалось практически до плиоценового времени. В Высоком Загросе период деформации охватывает временной промежуток от конца миоцена — начала плиоцена ($5,3\text{—}4,9$ млн лет) до конца плиоцена ($2,7\text{—}2,3$ млн лет). Далее деформация переместилась в зону Низкого Загроса, что соответствует временному периоду с позднего плиоцена — гелазия ($3,1\text{—}2,3$ млн лет) до позднего калабрия — начала среднего плейстоцена ($1,2\text{—}0,7$ млн лет). Установлено, что в Предгорной зоне коллизия началась в средне-плейстоценовое время ($0,9\text{—}0,5$ млн лет назад) и продолжается до настоящего времени. Пологие складки возникли перед фронтом Главного надвига в Чешуйчатой зоне вследствие коллизии и затем сжатия. Эти складки подобны тем, что сейчас развиваются в Предгорной зоне. С увеличением складчатых изгибов, появлением большего количества складок возникло скольжение осадочного чехла по отдельным плоскостям, которые постепенно сливались в общий срыв в вендской солевой формации Ормуз. При этом скорость роста складчатой зоны постоянно повышалась. Происходило увеличение толщины отслоенного фундамента при сжатии, фундамент при этом продолжал пододвигаться в зоне Главного надвига. К этому времени потенциал сжатия и коллизий Чешуйчатой

зоны полностью исчерпался, в связи с чем произошло ее поднятие. В то же время глубинное продвижение сместилось во фронт Чешуйчатой зоны. Перед ним началась точно такая же последовательность деформаций, приведшая к формированию Высокого Загроса, после чего аналогичные процессы происходили в Низком Загросе, а затем в Предгорной зоне. Размеры срыва чехла и ширина складчатых участков в сегменте Дезфул значительно меньше, чем в сегменте Фарс. Следовательно, Фарс более тектонически сложен, что объясняет большую сейсмичность провинции Фарс по сравнению с Дезфул [4].

Таким образом, активная тектоника рассматриваемого региона определяется подвижками по разломам и смещениями по ним, простирающимися на восток или восток — северо-восток и на север или север — северо-запад, одновременно в двух направлениях. Широтные активные нарушения преобладают на севере. Кулисный ряд разломов наряду

с взбросовой составляющей характеризуется активными смещениями правого сдвига. Он протягивается вдоль Загроса. Стоит отметить, что для рассматриваемого региона характерно преимущественно меридиональное направление горизонтального сжатия с параллельным укорочением земной коры.

3. Сопоставление тектонической обстановки рассматриваемого региона с сейсмической активностью

Кластеры эпицентров землетрясений трассируют зоны активных разломов. Глубина гипоцентров показывает абсолютное значение глубины, где находится активная зона разлома. Механизмы очагов землетрясений отражают поля тектонических напряжений и направления перемещений по разлому, т.е. кинематический тип разлома. Изменения интенсивности и распространения очагов землетрясений, а также их местоположение неплохо коррели-

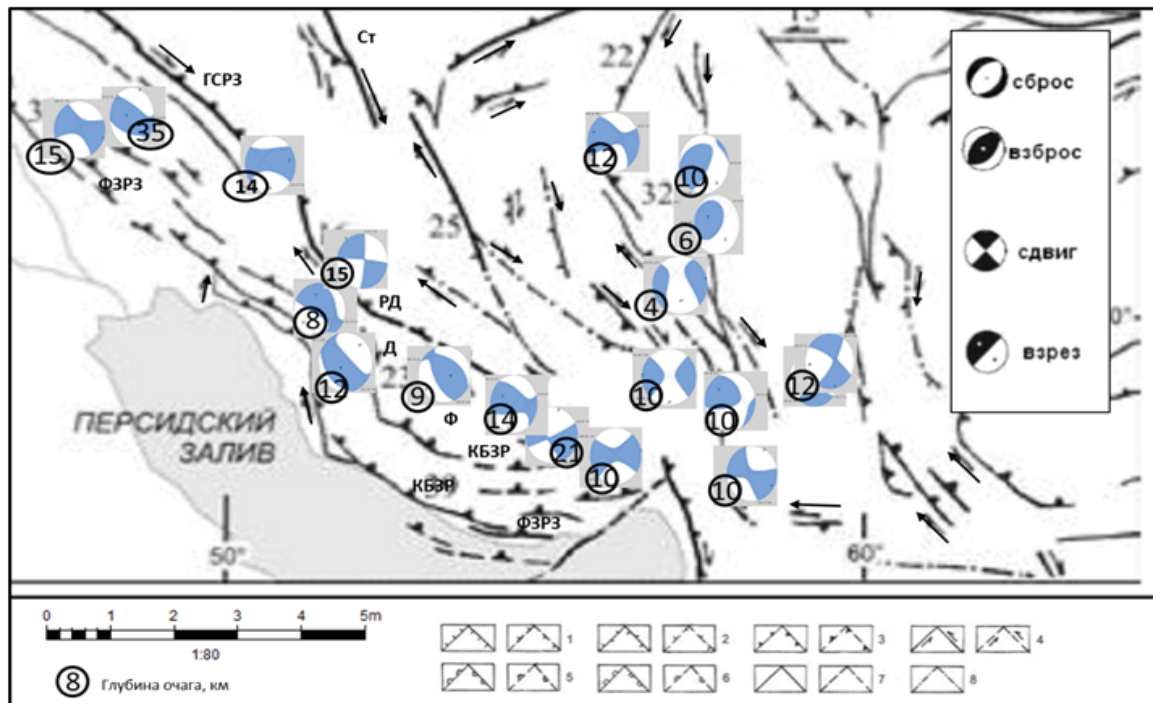


Рис. 3. Карта механизмов очагов землетрясений в период 2005—2017 гг.:

СВАЗ — Северо-Восточная Анатолийская зона разломов; САЗР — Северо-Анатолийская зона разломов; ГСРЗ — Главный современный разлом Загроса (правый сдвиг); ФЗРЗ — фронтальная зона разлома Загроса; РД — разлом Дена (правый сдвиг и надвигание); КБЗР — Казерун-Борзджанская зона разлома (правый сдвиг); КБР — разлом Карех-Бас (правый сдвиг); ИЗ — Иракская зона; Ст — Северо-Тегеранский разлом; Д — провинция Дезфул; Ф — провинция Фарс; Ч — Чешуйчатая; В — Высокий Загрос; Н — Низкий Загрос; П — Предгорная; 1 — сбросы; 2 — раздвижки; 3 — надвижки и взбросы; 4 — сдвиги; 5 — флексуры; 6 — продолжение зон субдукции; 7 — разломы с неопределенным типом смещения; 8 — разломы, активные в среднем плейстоцене. Цифры — это глубины очагов землетрясений (в км)

[Figure 3. Map of earthquake foci mechanisms in the 2005—2017 period:

СВАЗ — North-East Anatolian fault zone; САЗР — North Anatolian fault zone strikes; ГСРЗ — The Main modern Zagros fault (right shift); ФЗРЗ — front fault zone Zagros; РД — Den fault (right shift and thrust); КБЗР — Kazerun-Burzjansky the fault zone (right shift); КБР — Kareh-Bassa fault (right shift); ИЗ — Iraq zone; Ст — Северо-Тегеранский разлом; Д — Dezful province; Ф — Fars province; Ч — Scaly; В — High Zagros; Н — Low Zagros; П — Piedmont; 1 — discharges; 2 — expansions; 3 — thrusts and reverse faults; 4 — shifts; 5 — flexures; 6 — subduction zones; 7 — faults with an uncertain type of displacement; 8 — faults active in the middle Pleistocene.

The numbers are the depths of earthquake foci (in km)]

руются с геодинамическими изменениями и тектоническими событиями на границах плит (рис. 3). Установлено, что в обстановках относительного растяжения сейсмическая активность возрастает. Полученные фокальные механизмы для 70 землетрясений, произошедших в период 2005—2017 гг., соответствуют Казерун-Боразджанской зоне сдвигов и в то же время показывают наличие взрезовых механизмов. Это соответствует общей тектонической обстановке рассматриваемой территории. Характер смещений по разломам говорит о северо-восточном направлении максимального укорочения, или сокращения, земной коры. Это направление совпадает с направлением сжатия в очагах большинства крупных землетрясений региона.

Заключение

Геологическое развитие рассматриваемой территории делится на два основных периода. Первый период в составе древней континентальной окраины океана Тетис. Второй — это период развития Месопотамского передового прогиба. Первый период намного длительнее второго и включает палеозой, мезозой и палеоцен-эоценовое время; второй — олигоценное, миоценовое, плиоценовое и четвертичное времена. Второй период характеризуется коллизионной концепцией развития и делится в свою очередь на две стадии: ранняя происходила с конца эоцена до начала позднего миоцена, поздняя приходится на конец миоцена до голоцена. Стадии характеризуются различными термодинамическими и тектоническими условиями, что определяет стиль деформаций и напряжений. На ранней стадии происходили латеральные перемещения тектонически расслоенной земной коры — сдвиги. Расслоению способствовал интенсивный прогрев коры, который выражался в проявлении интенсивного магматизма. На поздней стадии имели место прогрев и расслоение коры. Уменьшилась степень перемещения блоков, появилось воздымание территории, что привело к образованию взбросовых и сбросовых структур.

В результате горизонтальных перемещений фрагменты разновозрастной океанической коры оказались перекрыты блоками континентальной коры, отдельные части вдавлены на глубины 50—80 км, чаще всего вдавливание происходило на глубины 15—20 км. Это находит отражение при анализе данных прошедших землетрясений и их фокальных механизмов: средняя глубина очагов землетрясений в период 2005—2017 гг. составляет

13—15 км. В таких погружающихся фрагментах накапливались значительные напряжения, влияющие на возникновение современных землетрясений, а также определяющие их интенсивность и силу.

Новейший тектогенез в пределах рассматриваемой территории является многофакторным процессом, в который входят коллизионное столкновение плит и различных тектонических блоков, глубинные структурные, фазовые и вещественные изменения, связанные с влиянием на литосферу потоков активной астеносферы, а также структурные преобразования, связанные с отсложкой осадочного чехла и верхней части земной коры. Все эти факторы определяют интенсивность и силу землетрясений в пределах акватории Персидского залива. Наиболее тектонически осложнена провинция Фарс, что определяет повышенную сейсмичность в средней части Персидского залива. Исходя из этих закономерностей тектонического строения и связи с сейсмичностью рассматриваемого региона необходимо планировать с инженерной точки зрения строение зданий и других сооружений, а также разработку и эксплуатацию нефтяных и газовых месторождений. В этом заключаются прикладной аспект и практическое значение тектонофизики и геодинамики.

Список литературы

- [1] Трифонов В.Г. Неотектоника, современная геодинамика и сейсмическая опасность Сирии. М.: Геос, 2012. 100 с.
- [2] Бейдун З.Р., Даннингтон Г.В. Нефтяная геология и ресурсы Ближнего и Среднего Востока / пер. с англ.; под ред. В.И. Высоцкого. М.: Недра, 1977. 135 с.
- [3] Забель Х.Г., Сиднев А.В. Формирование структур Месопотамского (Ирак) и Волго-Уральского (Россия) бассейнов в герцинский этап развития земной коры // Нефтяное хозяйство. 2008. № 12. С. 29—31.
- [4] Зоненшайн Л.П. и др. Глобальная тектоника, магматизм и металлогения. М.: Недра, 1976. 231 с.
- [5] Асланов Б.С. Нефтегазоносные провинции Персидского залива и Южного Каспия — реликтовые остатки палеотетиса // Каротажник. 2012. № 10. С. 4—11.
- [6] Высоцкий И.В., Высоцкий В.И., Оленин В.Б. Нефтегазоносные бассейны зарубежных стран. М.: Недра, 1990. 206 с.
- [7] Григоренко Ю.Н., Соболев В.С. Детальный прогноз — основа эффективных нефте- и газопоисков в акваториях морей России // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2013. Т. 8. № 1. С. 67.
- [8] Григоренко Ю.Н. О нефтегазонакоплении на окраинах континентов // Теория и практика нефтегеологического прогноза: сб. статей. СПб.: ВНИГРИ, 2008. С. 161—183.

- [9] Гаврилов В.П. Геодинамическая модель нефтегазообразования в литосфере и ее следствия // Геология нефти и газа. 1998. № 6. С. 2—12.
- [10] Демидов В.А. Особенности нефтегазоносного бассейна Персидского залива // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. 1994. № 11. С. 14—18.
- [11] Забанбарк А. Геолого-геохимические предпосылки нефтегазоносности Персидского залива // Советская геология. 1986. № 11. С. 112—114.
- [12] Нугманов А.Х. Факторы, влияющие на величину коэффициента удачи открытия месторождений в регионах северо-восточного борта Амударьинского седиментационного бассейна // Вестник ЦКР Роснедра. 2010. № 1. С. 22—26.
- [13] Нугманов А.Х. К методике анализа аномально высоких пластовых давлений // Вопросы геологии и тектоники нефтегазоносных областей Узбекистана. Вып. XXXI. Ташкент: САИГИМС, 1978. С. 39—55.
- [14] Ребецкий Ю.Л., Лукк А.А., Татевосян Р.Э., Быкова В.В. Определение фокальных механизмов слабых землетрясений и современная геодинамика юга Ирана // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 971—988.
- [15] Основы гидрогеологии. Гидрохимия / отв. ред. С.Л. Шварцев. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1982. 286 с.
- [16] Дмитриевский А.Н., Сагалевиц А.М., Баланюк И.Е., Матвеевков В.В. Роль гидротермальной дегазации в процессах углеводородообразования // Геология нефти и газа. 1996. № 8. С. 4—13.
- [17] Дмитриевский А.Н., Баланюк И.Е., Каракин А.В., Повещенко Ю.А. Современные движения земной коры и механизм возобновления запасов углеводородов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2007. № 5. С. 9—20.
- [18] Верма М.К., Альбрандт Т.С., Аль-Гайлани М. Запасы нефти и нераскрытые ресурсы в общих нефтяных системах Ирака: рост запасов и последствия для производства // ГеоАрабия. 2004. С. 51—74.
- [19] Тьен Х.В. Условия нефтегазообразования и формирования углеводородных скоплений в кайнозойских осадочных бассейнах континентального шельфа СРВ: автореф. дис. ... д-ра геол.-минер. наук. 1999. 40 с.

Для цитирования:

Абрамов В.Ю., Алджабасини Х. Литологические особенности стратиграфии и тектонического районирования сейсмически активного Загросского краевого прогиба в пределах акватории Персидского залива // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 1. С. 57—65. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-57-65

Research paper

Lithological features of stratigraphy and tectonic zoning of seismically active Zagros regional trough within the waters of the Persian Gulf

Vladimir Yu. Abramov*, **Hiba Aljabasini†**

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation

Article history:

Received: January 21, 2019

Revised: February 21, 2019

Accepted: February 25, 2019

Keywords:

geology;
tectonics;
seismology;
earthquake;
Persian gulf

The article discusses some features of the stratigraphy and the main points of the tectonic characteristics of the Zagros (Mesopotamian) regional deflection due to its seismic activity and oil and gas potential. The stratigraphy within the whole Pre-Zagrosky regional trough, despite its length, is similar in different parts, the main differences are related to the tectonic structure. The formation of the folds was mainly influenced by tectonic movements during the formation of alpine folding. A significant amount of work was carried out on the basis of the comprehensive analysis of the NEIC earthquake catalogs (The National Earthquake Information Center), formed by the United States Geological Survey. Ideas about the structure of the region under consideration were carried out on the basis of a study of literary sources, as well as the integration of data from previous author studies. Comparison of data on earthquakes that occurred in the period 2005—2017 and the reconstruction of the tectonic development of the region under consideration helped to establish links between earthquakes and tectonically active zones, and ultimately, determine the seismic hazard of different parts of the Persian Gulf. The article shows the main tectonic causes of earthquakes. The article has practical importance in predicting future natural phenomena and the position of their foci, as well as in determining the causes of events that have already occurred.

* Associate Professor of Department of Geology, Mining and Oil & Gas Engineering, Candidate of Geological Sciences; geophy-rudn@mail.ru

† Postgraduate student of Geology, Department of Geology, Mining and Oil & Gas Engineering

References

- [1] Trifonov VG. *Neotektonika, sovremennaya geodinamika i seismicheskaya opasnost' Sirii* [Neotectonics, modern geodynamics and seismic danger of Syria]. Moscow: Geos Publ.; 2012. (In Russ.)
- [2] Beidun ZR, Dunnington GV. *Neftyanaya geologiya i resursy Blizhnego i Srednego Vostoka* [Petroleum Geology and Resources of the Near and Middle East]. Moscow: Nedra Publ.; 1977. (In Russ.)
- [3] Zaibel HG, Sidnev AV. Formirovaniye struktur Mesopotamskogo (Irak) i Volgo-Ural'skogo (Rossiya) basseynov v gertsinskiy etap razvitiya zemnoy kory [Formation of the structures of the Mesopotamian (Iraq) and Volga-Ural (Russia) basins in the Hercynian stage of development of the earth's crust]. *Neftyanoye khozyaystvo* [Oil industry]. 2008;(12): 29–31. (In Russ.)
- [4] Zonenshayn LP et al. *Global'naya tektonika, magmatizm i metallogeniya* [Global tectonics, magmatism and metallogeny]. Moscow: Nedra Publ.; 1976. (In Russ.)
- [5] Aslanov BS. Neftgazonosnyye provintsii Persidskogo zaliva i Yuzhnogo Kaspiya — reliktovyeye ostatki paleotetisa [Oil and gas provinces of the Persian Gulf and the South Caspian — Relict remnants of paleotethis]. *Karotazhnik* [Karotzhnik]. 2012;(10): 4–11. (In Russ.)
- [6] Vysotsky IV, Vysotsky VI, Olenin VB. *Neftgazonosnyye basseyny zarubezhnykh stran* [Oil and gas basins of foreign countries]. Moscow: Nedra; 1990. (In Russ.)
- [7] Grigorenko YuN, Sobolev VS. Detal'nyy prognoz — osnova effektivnykh nefte- i gazoposkov v akvatoriyakh morey Rossii [Detailed Forecast — The Basis of Effective Oil and Gas Exploration in the Waters of the Seas of Russia]. *Neftgazovaya geologiya. Teoriya i praktika* [Petroleum Geology — Theoretical and Applied Studies]. 2013;8(1): 67. (In Russ.)
- [8] Grigorenko YuN. O neftegazonakoplenii na okrainakh kontinentov [On oil and gas accumulation on the margins of continents]. *Teoriya i praktika neftegeologicheskogo prognoza: sb. statey* [Theory and practice of oil and geological forecast: collection of articles]. Saint Petersburg: VNIGRI; 2008. p. 161–183.
- [9] Gavrilov VP. Geodinamicheskaya model' neftegazo-obrazovaniya v litosfere i yeye sledstviya [Geodynamic model of oil and gas formation in the lithosphere and its consequences]. *Geologiya nefi i gaza* [Oil and Gas Geology]. 1998;(6): 2–12. (In Russ.)
- [10] Demidov VA. Osobennosti neftegazonosnogo basseyna Persidskogo zaliva [Features of the oil and gas basin of the Persian Gulf]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh mestorozhdeniy* [Geology, Geophysics and development of oil fields]. 1994;(11): 14–18. (In Russ.)
- [11] Zabanbark A. Geologo-geokhimicheskiye predposylki neftegazonosnosti Persidskogo zaliva [Geological and geochemical preconditions of petroleum potential of the Persian Gulf]. *Sovetskaya geologiya* [Soviet geology]. 1986;(11): 112–114. (In Russ.)
- [12] Nugmanov AH. Faktory, vliyayushchiye na velichinu koeffitsiyenta udachi otkrytiya mestorozhdeniy v regionakh severo-vostochnogo borta Amudar'inskogo sedimentatsionnogo basseyna [Factors affecting the magnitude of the success rate of discovery of deposits in the regions of the northeast side of the Amudarya sedimentary basin]. *Vestnik TSKR Rosnedra*. 2010;(1): 22–26. (In Russ.)
- [13] Nugmanov AH. K metodike analiza anomal'no vysokikh plastovykh davleniy [To the method of analysis of abnormally high reservoir pressures]. *Voprosy geologii i tektoniki neftegazonosnykh oblastey Uzbekistana. Vyp. XXXI* [Questions of geology and tectonics of the oil and gas regions of Uzbekistan. Issue XXXI]. Tashkent: SAIGIMS Publ.; 1978. p. 39–55. (In Russ.)
- [14] Rebetsky YuL, Lucc AA, Tatevosyan RE, Bykova VV, Schmidt OYu. Opredeleniye fokal'nykh mekhanizmov slabykh zemletryaseniy i sovremennaya geodinamika yuga Irana [Determination of focal mechanisms of weak earthquakes and modern geodynamics of southern Iran]. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics and Tectonophysics]. 2017;8(4): 971–988. (In Russ.)
- [15] Shvartsev SL. *Osnovy gidrogeologii. Gidrokhiimiya* [Basics of hydrogeology. Hydrochemistry]. Novosibirsk: Science, Sib. Sep.; 1982. (In Russ.)
- [16] Dmitrievsky AN, Sagalevich AM, Balanyuk IE, Matveyenkov VV. Rol' gidrotermal'noy degazatsii v protsessakh uglevodorodooobrazovaniya [The role of hydrothermal degassing in the processes of carbohydrate generation]. *Geologiya nefi i gaza* [Geology of oil and gas]. 1996;(8): 4–13. (In Russ.)
- [17] Dmitrievsky AN, Balanyuk IE, Karakin AV, Veshchenko YuA. Sovremennyye dvizheniya zemnoy kory i mekhanizm vozobnovleniya zapasov uglevodorodov [Modern movements of the earth's crust and the mechanism for the recovery of hydrocarbon reserves]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy* [Geology, geophysics and development of oil and gas fields]. 2007;(5): 9–20. (In Russ.)
- [18] Verma MK, Ahlbrandt TS, Al-Gailani M. Zapasy nefi i neraskrytyye resursy v obshchikh neftyanykh sistemakh Iraka: rost zapasov i posledstviya dlya proizvodstva [Petroleum reserves and undiscovered resources for Iraq: reserve growth and production implications]. *GeoArabia* [GeoArabia]. 2004. 51–74. (In Russ.)
- [19] Thien HV. *Usloviya neftegaobrazovaniya i formirovaniya uglevodorodnykh skopleniy v kaynozoykskikh osadochnykh basseynakh kontinental'nogo shel'fa SRV*: avtoref. dis. ... d-ra geol.-miner. [Conditions of oil and gas formation and the formation of hydrocarbon accumulations in the Cenozoic sedimentary basins of the continental shelf of the CRV: author's abstract. dis. PhD. geol.-miner sciences]. 1999. (In Russ.)

For citation:

Abramov VYu, Aljabasini H. Lithological features of stratigraphy and tectonic zoning of seismically active Zagros regional trough within the waters of the Persian Gulf. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(1): 57–65. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-57-65 (In Russ.)



Research paper

DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-66-78

UDC 528.8.04

Application of remote sensing for monitoring of flood areas

N. Suárez Kozov*, D. Trujillo Osorio†, J. Giraldo Osorio‡

* Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation

†‡ Pontificia Universidad Javeriana, Carrera 7 No. 40—62, Bogotá 11023, Colombia

Article history:

Received: November 02, 2018

Revised: January 15, 2019

Accepted: January 29, 2019

Keywords:

remote sensing;
subpixel flood areas;
subpixels;
resolution;
coverage

Traditional measurement techniques “in situ” sometimes fail to magnify the spatial distribution of floods. For these cases, the remote sensors provide methodologies of very low economic cost and high reliability when mapping flooded areas and quantifying the damages. Due to the dynamic nature of these phenomena, it is necessary to use satellite images of high temporal resolution, however this type of images usually have a low spatial resolution. In relation to this problem, traditional classification techniques are not reliable enough for flood delineation and monitoring since they use “hard methods” of classification, where the coarse pixel is assigned a single type of coverage. On the other hand, “smoothed methods” have the ability to assign different kinds of coverage to the interior of the thick pixel. The present investigation makes the application of a sub-pixel analysis methodology (sub-pixel analysis — SA) for the monitoring of flooded areas. The improvement of the delimitation is achieved with the use of topographic attributes provided by a digital terrain model (DTM). The methodology was applied to the monitoring in the Great Depression Momposina, specifically to delineate the swamp of Zapatos.

Introduction

The human, always in expansion, takes territory away from nature, increasing the affectation caused by natural disasters, such as earthquakes, tornadoes, hurricanes, storms, floods, droughts, etc. Some of these phenomena can be decimated in their damages with systems early alarms and their evolutions can be monitored. This is why it is important to use tools such as satellite images to support the characterization and study of terrestrial

phenomena. It is a topic of general interest, to have a tool at your fingertips which allows you to take free information from the different remote sensors such as the MODIS and Landsat and to transform it into useful information to delve into the natural phenomena that overwhelm the Earth.

Empirical sciences such as topography and photogrammetry have been emerging, as well as meteorology for the climatological study. However, several of these disciplines require obtaining data from

* Master student of Construction Department, Academy of Engineering; nikolaysuarez@gmail.com

† Magister of Department of Construction

‡ Associate Professor of Department of Construction, Polytechnical University of Cartagena, PhD in Water Resources Management

© Suárez Kozov N., Trujillo Osorio D., Giraldo Osorio J., 2019



a fieldwork, using specialized teams in each of the areas. Therefore, they require imminent displacement to the study area, sometimes finding unsuitable conditions for work, due to difficult accessibility. Man has been able to facilitate tasks that do not require physical presence, equipment such as satellites solve problems in which there were technical limitations, thus facilitating tasks such as obtaining instant results [1].

Currently, there is the geographic information systems (GIS), which provide effective tools for dealing with temporary space data, in addition to which they are very effective for archiving, displaying, analyzing and modeling geographic data when combining socio-political data such as borders and inhabited areas, these tools are useful for correct decision-making [2]. An example of this was the use of a GIS implemented by the Center for Research on Drought (CEISS) in Chihuahua (Mexico) as support for decision making which allowed permanently assess the areas that were affected by drought [3].

Another application of this technology is the magnification and mapping groundwater in northern Ethiopia, more precisely in the Valle de Raya [4]. The representation of this information was made graphically through a GIS, represented by layers schematic data such as areas of plant cover, populations, location of major livestock producers, until the presence of pollutants in watercourses. With the superposition of these data, very complete models are generated capable of modeling the behavior of droughts [3]. The dynamics of these phenomena is very high to achieve an adequate analysis satellite images with high resolution are required. The problem with this type of images is their temporal

resolution since the time between each of them is very long, relatively with the duration of these natural phenomena. However, there are satellite images with a higher temporal resolution, making possible in the best of cases a daily collection of information to carry out a valid monitoring. Because the spatial resolution of these high-resolution temporal images is, in general, very poor, many of the relevant data are lost because of the quality of the information. In response to this problem, there are sub-pixel analysis methodologies (sub-pixel analysis — SA), which use satellite images of moderate spatial resolution for these analyzes, demonstrating an efficiency of 80 % in the correct allocation of flooded areas [5]. As the main input of this project, we have a code base in language “C”, which is capable of executing the methodology; as an input parameter it receives a satellite image of moderate spatial resolution, and as a result it performs a classification of the image scenario at the subpixel level (with spatial resolution finer than the original satellite image). To verify the goodness of the classification, confusion matrices will be used between the result and a high-resolution satellite image.

1. Materials and methods

The sub-pixel methodology developed in that work was initially proposed in [5] where different mathematical models are used to validate hypotheses about the relationship between the spectral signatures, their proportion within and behavior in relation to the topography in a satellite image, which in the present work received modifications, which increase its effectiveness. The process of operation can be summarized in the Figure 1.

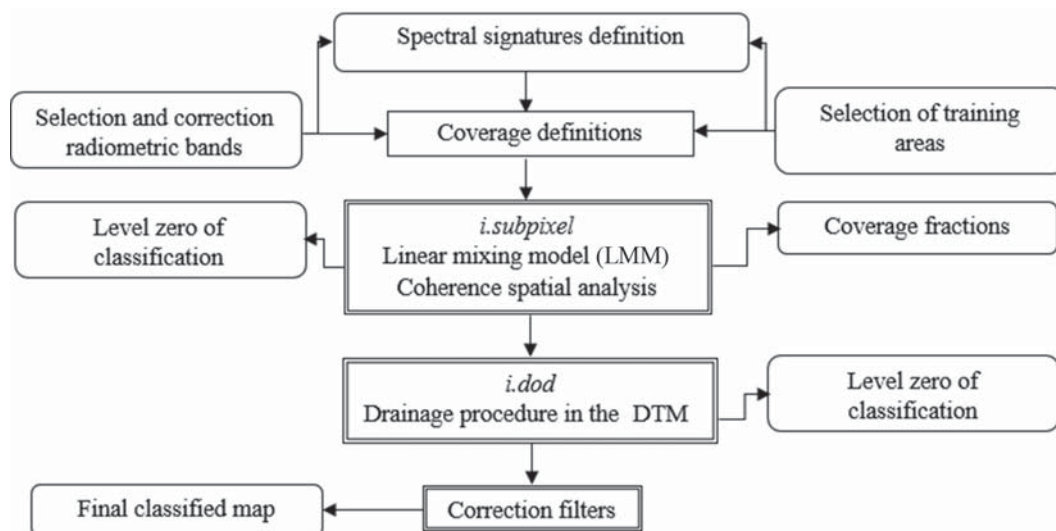


Figure 1. Sub-pixel methodology [5]

1.1. Linear mixing model (LMM)

The surfaces have unique spectral signatures which can be identified, therefore when a sensor of low spectral resolution that measures a thick pixel, it contains the linear combination of the radiations that are reflected in its interior. These types of well-discriminated coverages are called pure classes. However, the objective of the LMM is to abstract from the gross pixel the quantity of pure classes and the respective proportion, of the whole image and of the bands used in the analysis. To solve the previous unknowns the analysis is based on the solution of a system of equations with restrictions. Therefore, as was proposed in [5], the mathematical model can be represented in the following way:

$$R = E \cdot f + \varepsilon.$$

Fulfilling

$$\begin{cases} l^T \times f = 1 \\ 0 \leq f_{\Psi} \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

where R is the vector $n \times l$ that has the multispectral observation of the gross pixel; E represents the $n \times c$ matrix, where the elements $E_{(\Omega, \Psi)}$ are the spectral response of each pure class Ψ in the band Ω ; f is the vector containing the solution of the coverage fractions; ε is the residual error $n \times l$ vector; l vector symbolizes $c \times l$, where $l^T = [1, 1, \dots, 1]$; n is the number of bands used and c is the number of coverage classes.

The laws are very simple, the first law tries to express that the sum of the proportions of coverages within the gross pixel must be equal to one and is called sum constraint equal to one [5]. The second law proposes the restriction so that the contribution of each coverage is positive and in no way can be negative (positive restriction).

The solution can be found by raising the LMM as an optimization problem is based on the equations of this, that is, the equation of the vector of proportions R adding an error to the measurement, and restrictions of sum one and non-negativity, being the model mathematical proposed in [7].

At this point Lagrange multipliers are the ideal tool proposed by [7] to solve the optimization problem posed above, for this case the Lagrange equation would be given as follows:

$$\begin{aligned} L(f_1, f_2, \dots, f_c, \lambda) = \\ = \sum_{\Omega=1}^n [R_{\Omega} - R_{\Omega^*}]^2 - \lambda \times \left[\sum_{\Psi=1}^c f_{\Psi} - 1 \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

For the equation (2), we consider that $R_{\Omega} = R(\Omega)$, $R_{\Omega^*} = R(\Omega)^*$, $f_{\Psi} = f(\Psi)$ to have an easier notation. In the previous equation, it is well known that only the restriction of sum equal to one of the LMM is considered, due to the complexity of the non-negativity restriction, this will be implemented later if it becomes necessary.

When deriving and equaling zero, we propose a system of equations with $c + 1$ equations, which have as unknowns $f_1, f_2, f_3, \dots, f_c$ and λ , therefore the resulting derivatives are:

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 = 1 - \sum_{\Psi=1}^c f. \quad (3)$$

This system can be solved with the following expression:

$$K \times f_{\lambda} = C. \quad (4)$$

Within this matrix K_{ji} and C_i symbolize the following equations:

$$K_{ji} = 2 \times \sum_{k=1}^n E(k, j) \times E(k, i). \quad (5)$$

$$C = 2 \times \sum_{k=1}^n R(k) \times E(k, j). \quad (6)$$

For this case, the matrix K is symmetric. To solve this system of equations is used the factorization type LU (lower — upper) of the matrix K . The factorization by the method of Cholesky is not possible since K is semi-definite and positive. The sum constraint equal to one is guaranteed in the system $K \times f_{\lambda} = C f_k$, however the non-negativity constraint cannot be fulfilled since the solution vector f_k can be less than zero.

According to the work [5], a solution for the vector f_{λ} is proposed within the region considered feasible. At the moment of presenting a negative value in the vector f_k the construction of a new system identical to the previous one is considered, however in this the k -th row and column of the matrix is eliminated, in the same way for the vectors f_{λ} and C will eliminate the k -th element.

$$K_{\text{RED}} \times f_{\lambda-\text{RED}} = C_{\text{RED}}. \quad (7)$$

With the vector $f_{\lambda-\text{RED}}$ the system is solved, so it is possible to complete the solution vector f_{λ} using values of 0 in the k -th position, if the negative values persist in the vector $f_{\lambda-\text{RED}}$, it is possible to repeat the elimination and impersonation procedure of these values by zero if they are already presented once this method has been executed. The use of Lagrange multipliers brings greater

speed in the identification of proportions as a benefit, because it works more like an analytical process and not an iterative one according to [5].

1.2. Spatial coherence analysis

As it proposed in [8] the problem calve to make a correct classification sub-pixel is to assume that there is a certain relationship or spatial dependence between the sub-pixels inside and around the thick pixel, at the moment of dividing the thick pixel into small units or sub-pixels, a class of coverage is assigned to the new unit within the thick pixel.

In [9] they formulate the sub-pixel map as a linear optimization problem: it is assumed that the LMM contains C classes of coverages and that the resolution of the coarse pixel is divided into N sub-pixels. The number of sub-pixels that is assigned to coverage class i is NCi , derived from the fractional image. The spatial dependence will be calculated for each coverage class i and for each sub-pixel j . In each sub-pixel must be assigned a value of 1 or 0 for each coverage class, the value of 1 indicates that in place there is presence of the target coverage class, therefore the problem becomes the assignment of classes of coverage to sub-pixels and maximize spatial dependence. For the construction of the mathematical model, the variables X_{ij} were used and defined as:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} 1,$$

if the sub-pixel j contains the coverage class i , else 0.

Therefore, the mathematical model can be expressed as follows:

$$\max(z) = \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^N X_{ij} \times C_{ij}. \tag{8}$$

Assigning the following to the above equation:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^C X_{ij} = 1 & j = 1, 2, \dots, N; \\ \sum_{j=1}^N X_{ij} = NCi & i = 1, 2, \dots, C. \end{cases} \tag{9}$$

$$\tag{10}$$

After declaring the mathematical model, they proceed with the construction of a cost matrix for each type of coverage. The previously proposed restrictions are understood as:

- the first rule ensures that only a single coverage class is assigned to the sub-pixel (i, j) ;
- the aim of the second rule is to ensure for the $NC^{(\Psi)}$ sub-pixels the class Ψ is assigned correctly.

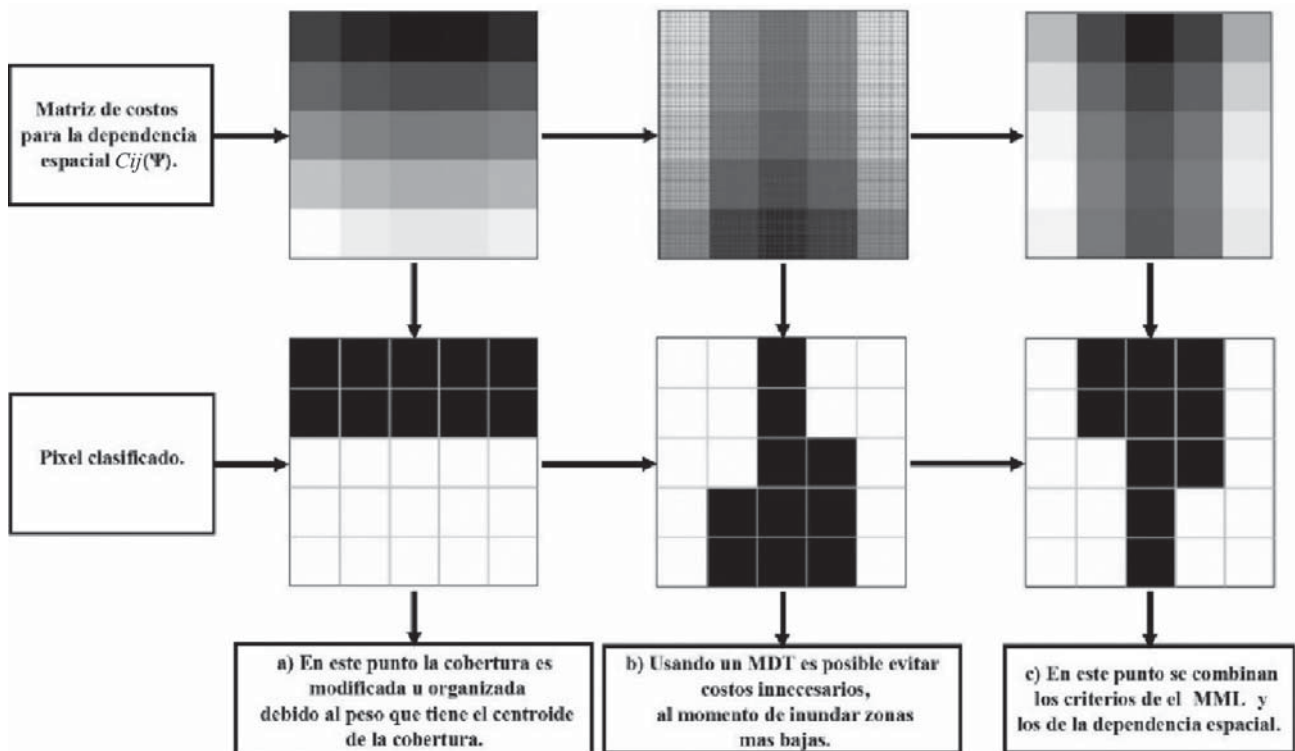


Figure 2. Scheme use cost matrix for the analysis of spatial coherence [6]

These functions and restrictions are linear in nature, so they can be solved by applying linear programming [8].

1.2.1 Costs Matrix

At this point, the cost matrix $C_{ij}^{(\Psi)}$ is necessary to solve the system of equations, to use this tool we start from previous hypotheses who was developed in [5] about the distribution of classes within the pixel:

- for there to be a class grouping Ψ it must be given around a centroid of that class;

- the topography is a determining factor for the identification of “water” or “flooded” zones, therefore these classes will always be generated and will flow towards low areas.

The diagram (Figure 2) explains how the cost matrix works for spatial coherence, in the lower part of the diagram are the assignments of the “water” or “flooded” coverage made by the cost matrices, where the dark colors represent the lower values and vice versa in relation to light colors that represent high values.

- a) The cost matrix is generated, considering only the principles of spatial coherence, using the distribution of the coverage fractions a centroid has been generated, in this case the costs will be lower depending on its proximity to it.

- b) The cost matrix generated with the principles related to the DTM of the gross pixel area is presented, in this case, the lowest values in the DTM will be the indicators for the lower areas.

- c) The combination of the criteria of a and b allows a sub-pixel assignment more coherent with principles of spatiality (neighboring values) and topography.

1.3. DTM and DOD drainage networks

Through a modification of the method proposed in [10], which generates a cost matrix, which aims to calculate the route with the lowest cost from a point (a) to a point (b). Specifying the DTM becomes the cost matrix and points (a) and (b) are the accumulation zones, in this way there will be drainage lines or lines between the two points, which in turn are based on the amount of times that drainage lines cross a pixel, verifying its class whether it is “flooded” or “dry”.

This method is modified [5] in which the proposed solution uses the directions of the flow to generate aggregation of new “flooded” class pixels. As inputs to this method use the map of drainage directions and the map of accumulations, which are products of the DTM.

This process is based on assigning with a value of +1 to the class pixels “flooded” and a value of -1 to the

“dry” class pixels in the initial conditions. As a premise, an amount n of sub-pixels will accumulate in the direction of the flow, as long as it is “flooded” and $n-1$ for the sub-pixels of the “dry” class. It is necessary to highlight that this algorithm works using the direction of the flow. The algorithm only accumulates for those sub-pixels that have a value greater than zero, in the case of the sub-pixels of value -1 upstream it will not subtract or add to the value of the downstream pixel, however this can become zero because it has a sub-pixel “flooded” Upstream, as a final result, all those sub-pixels that end with a positive value, and different from zero will be classified as “flooded”.

2. Results

To execute the sub-pixel methodology and the drainage network methodology in the digital terrain model, the commands called *i.subpixel* and *i.dod* were designed in [5] to be executed in the GRASS GIS free software. However, due to software update effects, these had to be modified in some of their functions present in their base code to work correctly in GRASS GIS V.7.0.

2.1. Study area for implementation of the methodology

The study area corresponds to the water mirror of the depression Momposina called “Ciénaga Candelaria Rincón Avisperos”, belonging to the complex of bodies of water known as “Ciénaga de Zapato”. This water mirror is formed in a delta of Magdalena River. For this study area, the examples and results are based on the DTM present in Figure 3. This DTM was processed and used with a spatial resolution of 50 meters, which is a resampling of the digital topography with a spatial resolution 30-meter original downloaded from the official USGS website.

2.2. Results command *i.subpixel* (level 0 of classification)

Two types of products can be obtained from the *i.subpixel* command, both of them very important for the analysis of the types of coverages present in our study area. The first of these products are the maps of coverage fractions, which will be equal to the number of classes that are defined at the time of the supervised classification; that is, each map will show only the pixels of the class in which it is focused, the rest will have a value of 0, the value of the pixels in which the class is present will be a function of the proportion of that class in that pixel. Below in Figure 4 you can see the maps of coverage

fractions for the five classes resulting from the supervised classification, these focused on identifying water bodies, bare soil and vegetation.

The maps of proportions of coverage provide us with the vision of the distribution of the different classes of coverages over the gross pixel, those presented and produced by this command are in units of percentage from 0 to 100%, where 0 is the absolute absence of the class in question and 100% as the true and absolute presence of this. In the maps, the units go from zero to 10 000, the highest value being the equivalent of 100%.

As a result of the methodology (classified map of level 0) is the map of Figure 5. This figure shows the base map for the following steps. The map originally had a resolution of 500 meters and the resulting i.subpixel module has a resolution of 50 meters. To make this analysis clearer, this map is reclassified into two clear classes, one referring to bodies of water and the other referring to coverings of soil and vegetation.

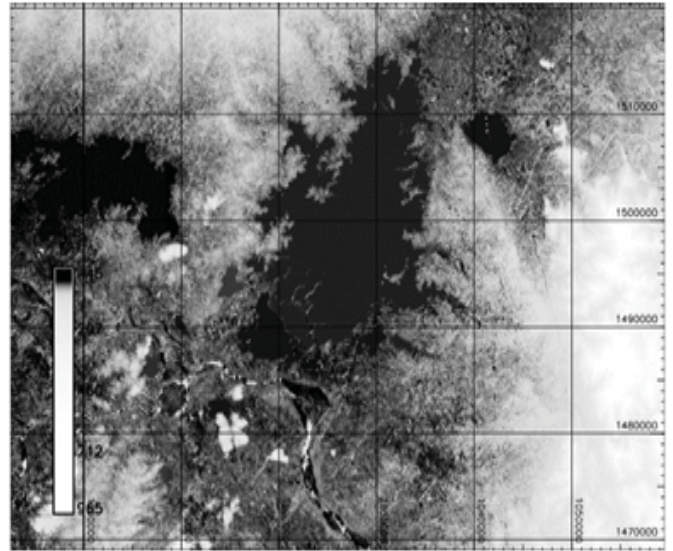


Figure 3. Digital terrain model of the study area

Source: U.S. Geological Survey. URL: www.usgs.gov

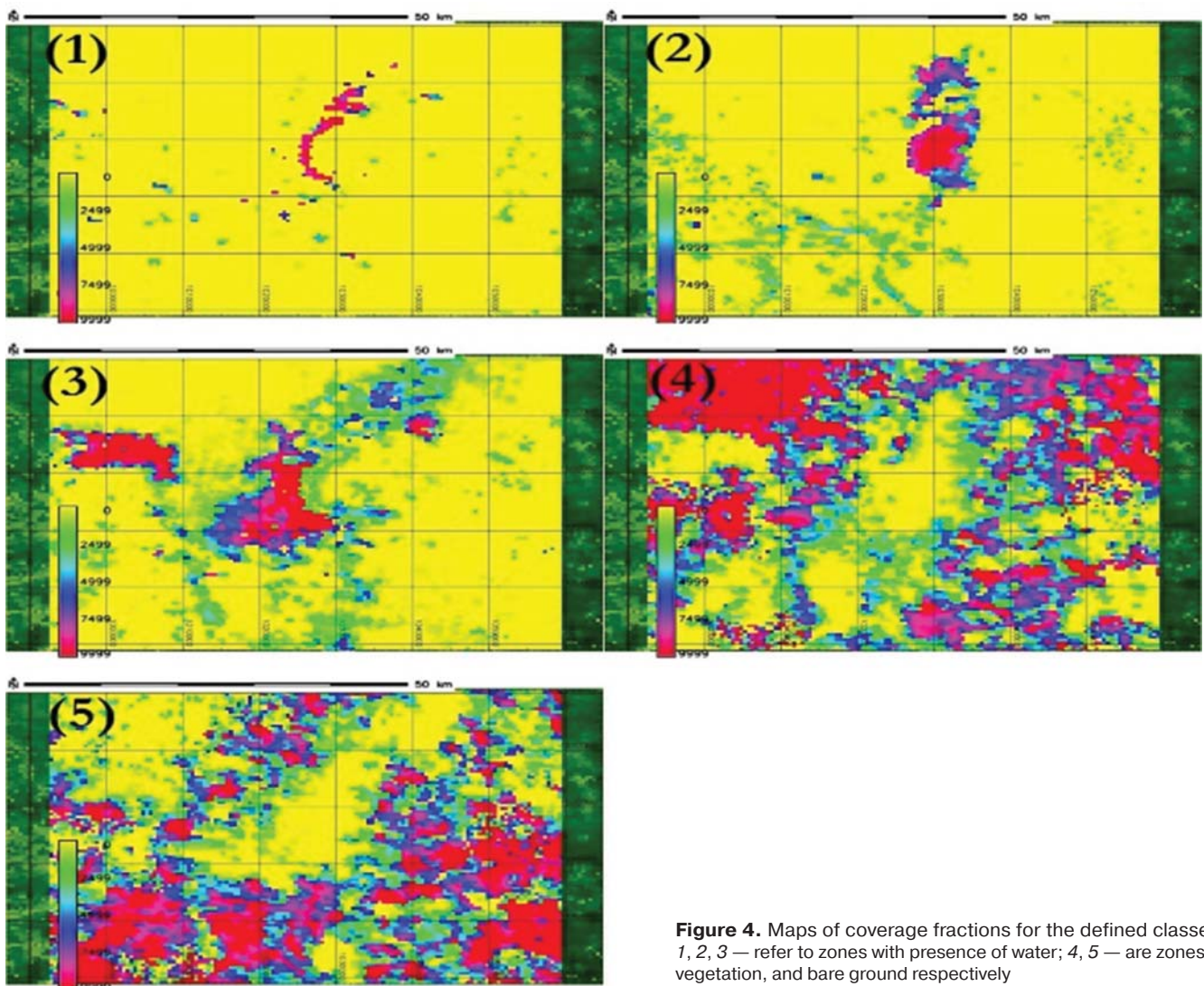


Figure 4. Maps of coverage fractions for the defined classes: 1, 2, 3 — refer to zones with presence of water; 4, 5 — are zones of vegetation, and bare ground respectively

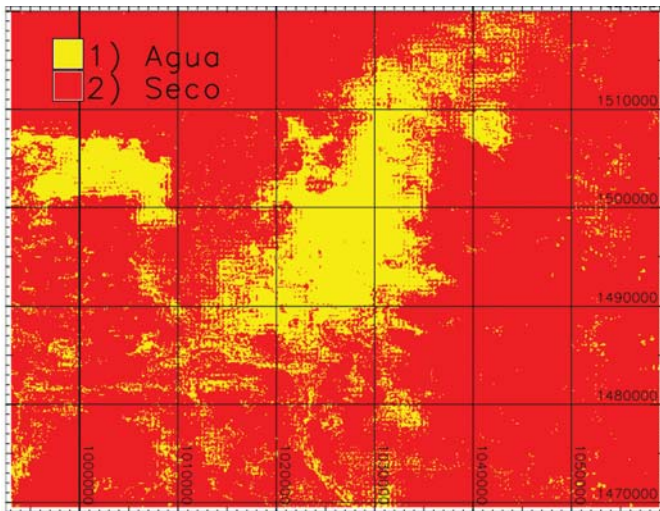


Figure 5. Map two classes (*i.subpixel*): yellow — water class; red — dry class

2.3. Results command *i.dod* (level 1 classification)

This command receives as inputs the accumulation maps and drainage directions obtained from the digital terrain model in the final resolution of the *i.subpixel*, i.e. 50 m, and the map resulting from level 0 of the classification. At this point, the working resolution must be the resolution of the output map of the *i.subpixel* command. The map resulting from this module is presented in Figure 6, which has the same sub-pixel classification map metadata, it should be noted that the *i.dod* module can be applied several times to improve its effect. It is noticeable how the algorithm extrapolates the “water” class zones using drainage and accumulated flow networks, both in the lotic water body and in the lentic water body.

2.4. Correction filters *r.neighbors*

This part of the process can be alternated between the two previous parts that is the correction by filters can be executed before executing the module *i.dod*, to reduce the noise; the effect of the *i.dod* module will be clearer. After the *i.dod* is also very effective to erase unnecessary data by the execution of this. This filter was executed with the popular criterion, and works with a neighborhood algorithm, that is, the most recurrent class in the neighborhood. At this point, the filters applied after the *i.subpixel* module and the *i.dod* module will be presented (Figure 7).

2.5. Comparison methodologies

To compare the methodologies in a more adequate way, the confusion matrices method between the supervised methodologies for the MODIS images versus the supervised classification executed for the Landsat images will be executed. Likewise, the sub-pixel methodology is compared with the supervised classification for Landsat images, in addition to this the error or deviation in the classifications with the reference methodologies is calculated with the Kappa index.

The evaluation criterion or variable was the number of sub-pixels or pixels of each map, identifying which class these belonged to, in order to obtain the number of pixels for each class and its corresponding area, the *r.stats* module was used, which facilitates this information.

The resulting maps are the main objective of this work, since the similarity and concordance of the sub-pixel classification of a MODIS image of 500 meters of spatial resolution is contrasted and appreciated, with the classification of an image with 30 meters and the notable

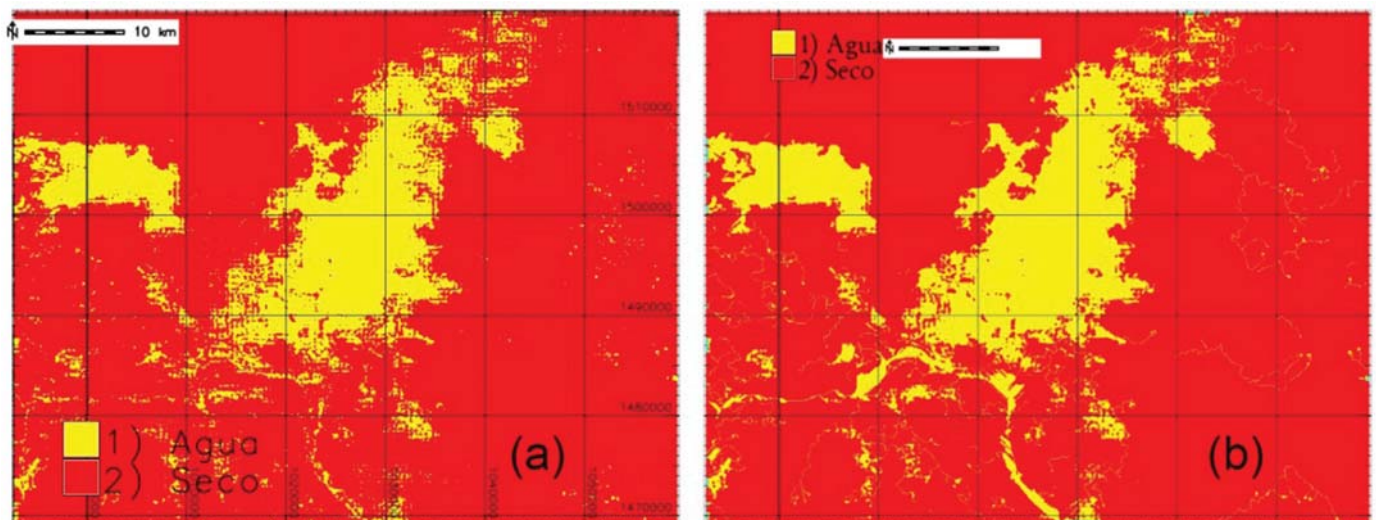


Figure 6. a — classification module map *i.subpixel*; b — *i.dod* map classification

difference of a common supervised classification of an image of moderate spatial resolution with a high-resolution image.

Each map will be accompanied by the confusion matrix, which shows the quantification of the variation and the success of the supervised classification with MODIS and the sub-pixel classification with respect to the classification made to the Landsat image. In Figure 8,

the comparison between the supervised classification for MODIS and Landsat will be shown.

On the map it is possible to appreciate the great water coverage that the MODIS image due to its limitations of spatial resolution fails to classify, especially the definition of the limits of the marsh and the Magdalena River, which is the body of water that generated this marsh, this variation is exposed in the following table.

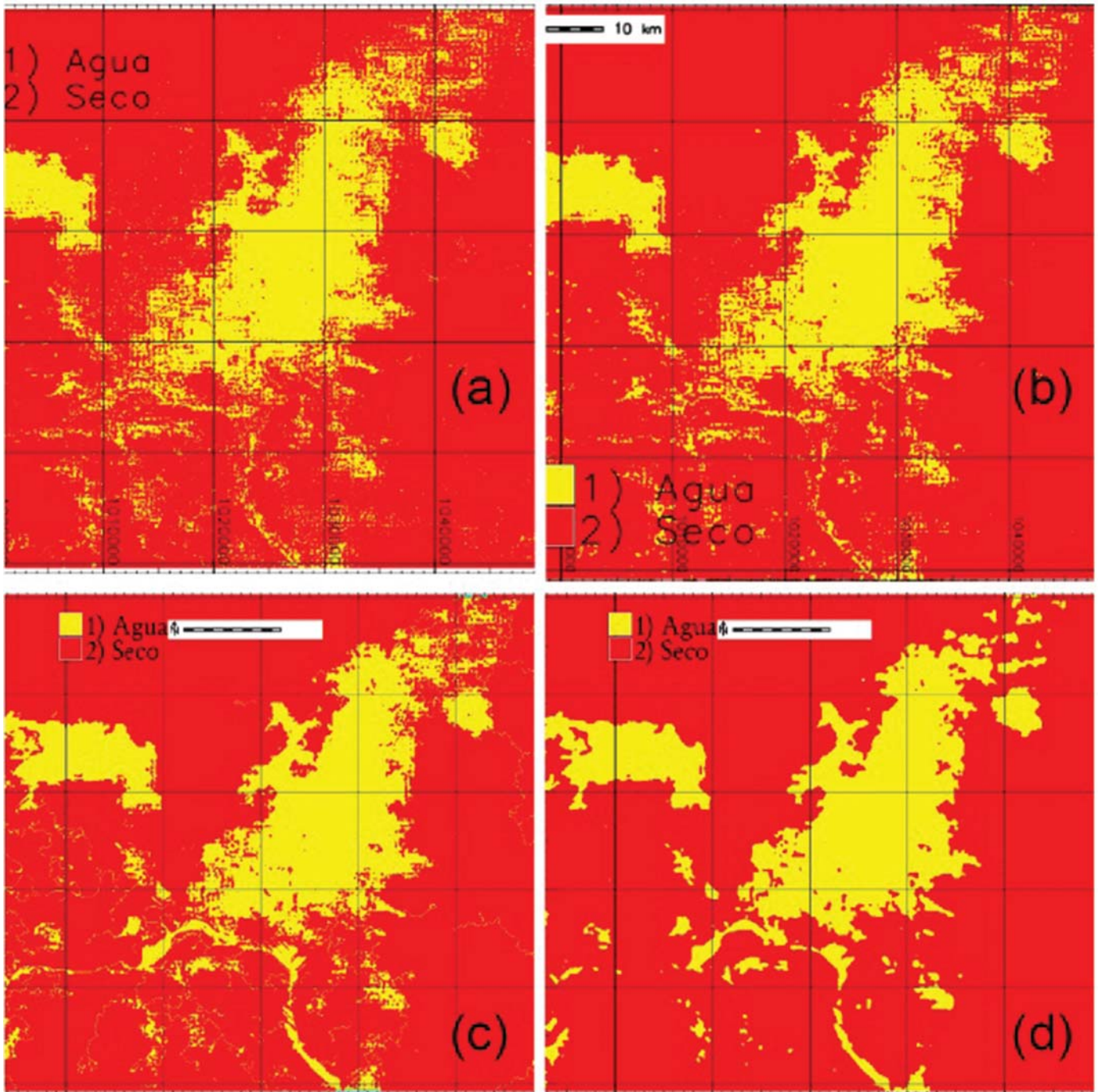


Figure 7. a — map *i.subpixel*; b — map *i.subpixel* with *r.neighbors 3x3*; c — map *i.dod*; d — map *i.dod* with *r.neighbors 9x9*

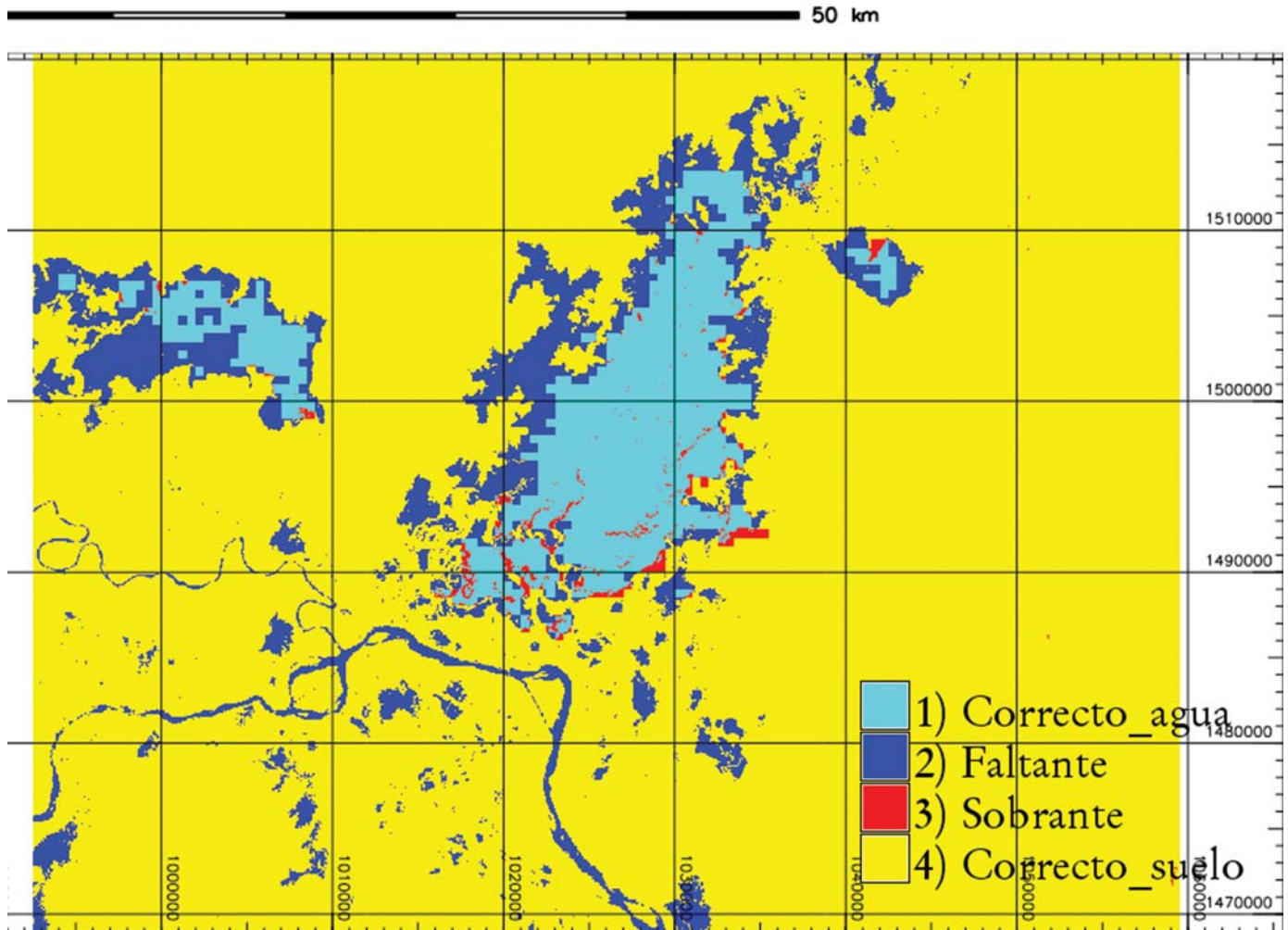


Figure 8. Validation of supervised classification for MODIS images based on supervised classification for Landsat:

1 — cyan: water properly mapped; 2 — blue: areas missing map; 3 — red: soil mapping as water; 4 — yellow: soil and vegetation correctly mapped

Table 1

Confusion matrix for supervised classification in MODIS versus supervised classification Landsat

	Number of pixels		Percentage	
	Water	Dry	Water	Dry
Water	90 922	6378	7%	0.4685%
Dry	108 496	1 174 331	8%	86%

As it is possible to appreciate in the confusion matrix, the total 8 percent of the image stopped being classified as body of water by the MODIS images being this body percentage of water in the Landsat images, belonging to the river water bodies and the limits of the swamp, this deviation between the two classification is also quantifiable with the Kappa index that gave a value of $k = 0.57$ (95% confidence interval = ± 0.0023), which indicates in a statistical way that the data are moderately similar to each other.

It is noteworthy to say that the use of this classification is not suitable for the delimitation of bodies of water on

this scale due to its poor accuracy evidenced in relation to the capacity of a Landsat image.

Now we will compare the sub-pixel classification of the MODIS image against the supervised classification of a Landsat image. In Figure 9, there will be this comparison.

Table 2

Confusion matrix for sub-pixel classification in MODIS versus supervised classification in Landsat

	Number of pixels		Percentage	
	Water	Dry	Water	Dry
Water	172 332	26 158	13%	two%
Dry	60 631	1 102 114	4%	81%

Visibly on the map it is possible to appreciate that the sub-pixel classification covers mostly the body of water classified by the MODIS image, in addition to the body of water in its initial part, however it classifies dry zones as wet, being able to solve this with the validation of an image of better resolution, because the considerable

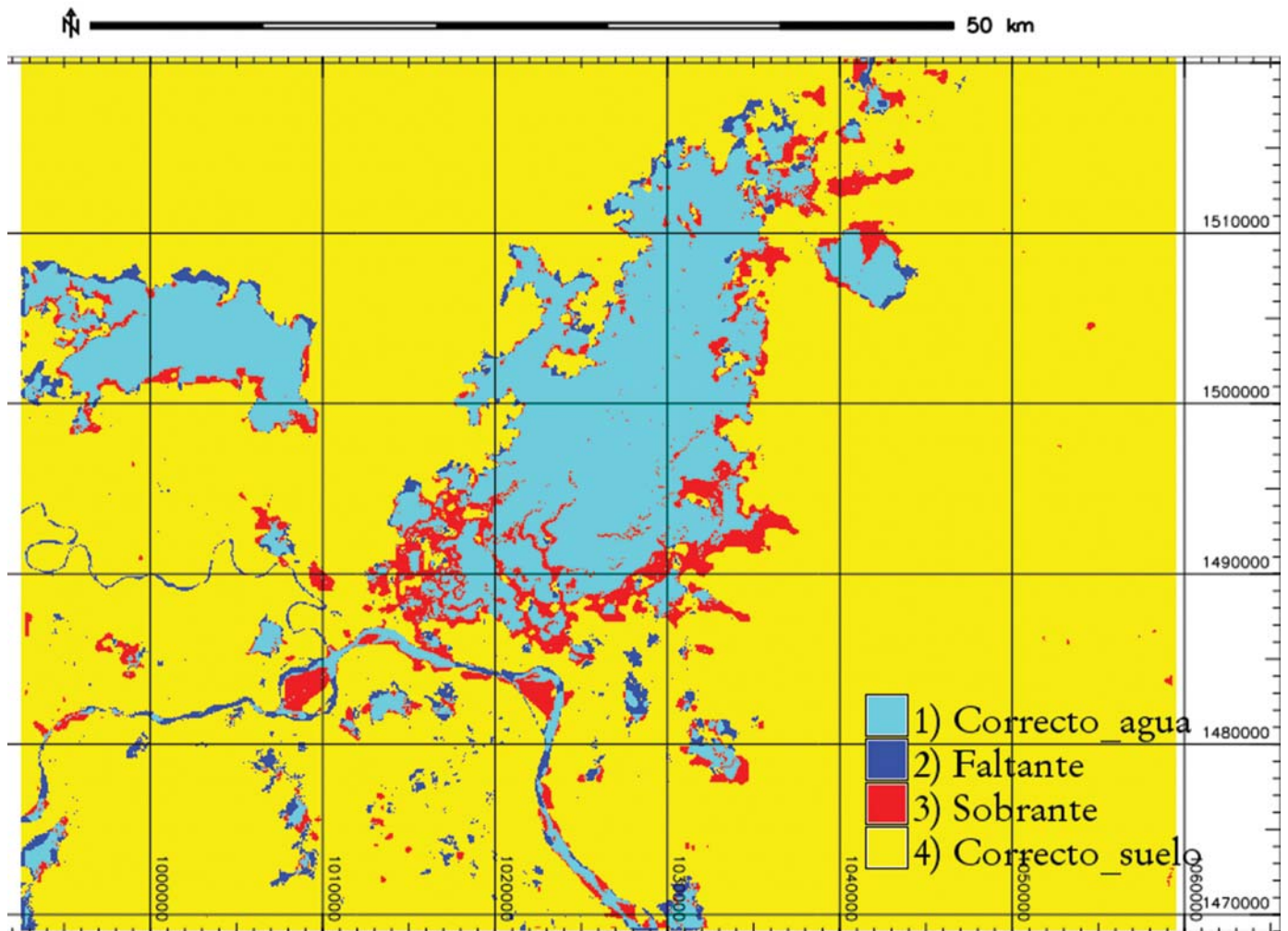


Figure 9. Validation of sub-pixel classification for MODIS images based on supervised classification for Landsat:
 1 — cyan: water properly mapped; 2 — blue: areas missing from mapping; 3 — red: soil mapping as water;
 4 — yellow: soil and vegetation correctly mapped

error would be in the non-classification of bodies of water, to quantify this validation will be exposed the confusion matrix below.

Once having the results of the confusion matrix it is remarkable to see that 13% of the total water mapped is correct and is presented in the two methodologies, in addition to the great decrease in the error with a single missing of 4% and a single 2% of incorrectly mapped soil, however the inclusion of the DTM is not enough to capture the bodies of water in which the Magdalena River divides, this problem coming from the initial resolution of MODIS images which are unable to capture these details, due to the scale of the image, if we consider that the Kappa index is of a $k = 0.76$ (95% confidence interval = ± 0.0015) statistically checking the similarity between the two classifications, showing that the classification sub-pixel is effective and very attached to the results that can be obtained with the use of satellite images of high spatial resolution.

Conclusions

At the end of all the results it was verified that the classification of sub-pixels, which in this case involves the linear mix model (LMM), the spatial coherence analysis (SCA) of the *i.subpixel* module and the use of drainage networks and accumulation maps of the digital terrain module *i.dod* is truthful and similar to classifying information of high spatial resolution in a common way.

The inclusion of DTM information as the topographic attributes of this and derived information such as drainage networks and accumulation maps validate from other sides the classification made for the sub-pixels, considering their behavior, which is directly linked to the characteristics of the land, emulating its behavior thanks to the zones of accumulation and projecting the possible presence of water joining the previous characteristics and drainage networks.

It was possible to perform the delimitation and classification of coverage of the “Ciénaga de Zapatos” using images of moderate spatial resolution through the use of the sub-pixel classification demonstrating improvements with respect to the common supervised classification method.

Since the use of images of moderate spatial resolution was the maximum of this work and was carried out successfully, it is possible to use positively the good temporal resolution that this type of information brings, making it possible to monitor the high dynamism of bodies of water.

The quality of the results of these classifications, whether these are the common ones or those proposed in this work, depend directly on the quality of the input data and on the concordance that these have with what it represents physically, for which it is necessary have a filter that evaluated the quality of these, before executing any type of classification.

The ability to obtain coverage information at the sub-pixel level of classified images makes this classification method a “soft” or more refined classification technique.

Since the access to the type of information used in this type of classifications, from the thickest to the most refined, is free, being this online route available to the entire population makes this technique an effective and highly economic tool for the development of research and inclusion in the projects and activities of developing countries.

Due to the great advantages it brings, both economically and operationally this technique has a very versatile and wide field of action with uses that can range from the construction of hazard or risk maps for bodies of water, monitoring of extensive bodies of water, delimitation of bodies of water, the use of different indices that allow focusing on different objectives, a number of uses that are based on the needs and that will contribute to research and data collection for scientific, economic and social uses.

References

- [1] Rodriguez Chavez OE, Arredondo Bautista HA. Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la NASA aplicado en estudios de ingeniería civil [tesis]. Bogotá; 2005. Available from: <https://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ingenieria/tesis123.pdf>
- [2] Stanbury KB, Starr RM. Applications of Geographic Information Systems (GIS) to habitat assessment and marine resource management. *OCEANOLOGICA ACTA*. 1999; 22(6): 699—703.
- [3] Hinojosa OR. Monitoreo de la sequía en Chihuahua mediante un sistema de información geográfica (GIS). *El Cid Editor — Ingeniería*. 2007.
- [4] Fenta A, Kifle A. Spatial analysis of groundwater potential using remote sensing and GIS-based multi-criteria evaluation in Raya Valley, northern Ethiopia. *Hydrogeology Journal*. 2015;23: 195—206. doi:10.1080/01431161.2011.608091.
- [5] Giraldo Osorio JD, García Galeano SG. Development of a sub-pixel analysis method applied to dynamic monitoring of floods. *International Journal of Remote Sensing*. 2012;33(7): 2277—2295.
- [6] García Galiano SG, Giraldo Osorio JD. *Desarrollo de un modelo de análisis de subpíxeles para el seguimiento dinámico de inundaciones*. Cartagena; 2008.
- [7] Hu YH, Lee HB, Scarpace FL. Optimal Linear Spectral Unmixing. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*. 1999;37(1): 639—644. doi 10.1109/36.739139
- [8] Verhoeve J, De Wulf R. Sub-Pixel Mapping of Sahelian Wetlands using Multi-Temporal SPOT VEGETATION Images. *Laboratory of Forest Management and Spatial Information Techniques Faculty of Agricultural and Applied Biological Sciences*. Gent — Belgica; 2000.
- [9] Hongen Z, Suhong L, Qizhong L, Jiancheng S. Sub-pixel lake mapping in Tibetan Plateau. *Geoscience and Remote Sensing Symposium IEEE*. 2004: 3073—3076. doi 10.1109/IGARSS.2004.1370347
- [10] Giacomelli A, Mancini M, Rosso R. Integration of ERS-1 Imagery and Digital Terrain Models for the Assessment of Flooded Areas. *3rd ERS SYMPOSIUM, Florence, 97; 2014 jul. 23; Milano, Italy*. Available from: <https://earth.esa.int/workshops/ers97/papers/mancini/index-2.html>
- [11] Hualin X, Guanrong Y, Guiying LB. Spatial evaluation of the ecological importance basen on GIS for enviromental management: a case study in Xingguo coutry of China. *Ecological Indicators*. 2014;51: 3—12. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.08.042
- [12] Klein Gebbinck MS. *Descomposition of mixed pixel in remote sensing images to improve the area estimation of agricultural fields* [dissertation]. Renkum; 1998. Available from: <https://repository.ubn.ru.nl/handle/2066/18654>
- [13] U.S. Geological Survey. *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook*. 29 March 2016. Available from: http://landsat.usgs.gov/l8handbook_section5.php
- [14] United States of America: Landsat Science 2015—16. Available from: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/?p=3186>
- [15] Richards JA, Xiuping J. *Remote Sensing Digital Image Analysis*. 5th ed. Berlin: Springer; 2013.
- [16] Zwenzner H, Voigt S. Improved estimation of flood parameters by combining space based SAR data with very high resolution digital elevation data. *Earth System Sciences*. 2009: 567—576.

For citation:

Suárez Kozov N, Trujillo Osorio D, Giraldo Osorio J. Application of remote sensing for monitoring of flood areas. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(1): 66—78. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-66-78 (In Russ.)

Применение дистанционного зондирования для мониторинга зон затопления

Н. Суарес Козов*, Д. Трухильо Осорио†, Х. Хиральдо Осорио‡

* Российский университет дружбы народов, *Российская Федерация*, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

† Папский Ксаверианский университет, *Колумбия*, 11023, Богота, Carrera 7 No. 40–62

История статьи:

Поступила: 02 ноября 2018

Доработана: 15 января 2019

Принята: 29 января 2019

Ключевые слова:

дистанционное зондирование;
субпиксели;
затопленные районы;
разрешение;
покрытие

Традиционные методы измерения площадей затопления «на месте» иногда приводят к значительным ошибкам или затруднениям, особенно когда площади затопления увеличиваются. В настоящее время многие методики определения площадей затопления земель паводковыми водами с использованием аэрокосмической фотосъемки характеризуются относительно низкой стоимостью при высокой достоверности данных. Динамическая природа паводкового затопления территорий обуславливает необходимость использования спутниковых изображений высокого разрешения с учетом временного фактора. Однако такие изображения, как правило, имеют низкое пространственное разрешение. В связи с этим традиционные методы классификации не являются достаточно надежными для очерчивания и мониторинга наводнений, так как используют «жесткие методы» классификации, присваивая уникальный тип покрытия большему пикселю. Кроме того, «сглаженные методы» имеют возможность назначать различные типы покрытий внутри толстого пикселя. Настоящее исследование посвящено применению методологии анализа субпикселей для мониторинга площадей во время наводнения. Улучшение делимитации достигается использованием топографических атрибутов, предоставляемых цифровой моделью местности. Эта методология была применена для мониторинга в Великой впадине Момпозина, в частности для того, чтобы очертить болото Сапатоза. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования сезонных паводковых подтоплений территорий в Российской Федерации, а также в других странах, для которых характерны сезонные колебания уровня поверхностных вод.

Список литературы

- [1] *Rodriguez Chavez O.E., Arredondo Bautista H.A.* Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la NASA aplicado en estudios de ingeniería civil: Дис. Bogotá, 2005. URL: <https://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ingenieria/tesis123.pdf> (дата обращения: 12.06.2015).
- [2] *Stanbury K.B., Starr R.M.* Applications of Geographic Information Systems (GIS) to habitat assessment and marine resource management // *OCEANOLOGICA ACTA*. 1999. Vol. 22. No. 6. Pp. 699–703.
- [3] *Hinojosa O.R.* Monitoreo de la sequía en Chihuahua mediante un sistema de información geográfica (GIS) // El Cid Editor — Ingeniería. 2007.
- [4] *Fenta A., Kifle A.* Spatial analysis of groundwater potential using remote sensing and GIS-based multi-criteria evaluation in Raya Valley, northern Ethiopia // *Hydrogeology Journal*. 2015. No. 23. Pp. 195–206.
- [5] *Giraldo Osorio J.D., García Galeano S.G.* Development of a sub-pixel analysis method applied to dynamic monitoring of floods // *International Journal of Remote Sensing*. 2012. Vol. 33. No. 7. Pp. 2277–2295.
- [6] *García Galiano S.G., Giraldo Osorio J.D.* Desarrollo de un modelo de análisis de subpíxeles para el seguimiento dinámico de inundaciones. Cartagena, 2008.
- [7] *Hu Y.H., Lee H.B., Scarpace F.L.* Optimal Linear Spectral Unmixing // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1999. Vol. 37. No. 1. Pp. 639–644.
- [8] *Verhoeve J., De Wulf R.* Sub-Pixel Mapping of Sahelian Wetlands using Multi-Temporal SPOT VEGETATION Images // *Laboratory of Forest Management and Spatial Information Techniques Faculty of Agricultural and Applied Biological Sciences*. Gent — Belgica, 2000.
- [9] *Hongen Z., Suhong L., Qizhong L., Jiancheng S.* Sub-pixel lake mapping in Tibetan Plateau // *Geoscience and Remote Sensing Symposium IEEE*. 2004. Pp. 3073–3076.
- [10] *Giacomelli A., Mancini M., Rosso R.* Integration of ERS-1 Imagery and Digital Terrain Models for the Assessment of Flooded Areas // *3rd ERS SYMPOSIUM*, Florence, 97; 2014 jul. 23. Milano, Italy.

* Магистрант департамента строительства, Инженерная академия; nikolaysuarez@gmail.com

† Магистрант департамента строительства

‡ Доцент департамента строительства, Политехнический университет Картахены, кандидат технических наук по управлению водными ресурсами

- [11] *Hualin X., Guanrong Y., Guiying L.B.* Spatial evaluation of the ecological importance basen on GIS for enviromental managment: a case study in Xingguo coutry of China // *Ecological Indicators*. 2014. Vol. 51. Pp. 3—12.
- [12] *Klein Gebbinck M.S.* Descomposition of mixed pixel in remote sensing images to improve the area estimation of agricultural fields: dissertation. Renkum, 1998.
- [13] U.S. Geological Survey. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. URL: http://landsat.usgs.gov/18handbook_section5.php (дата обращения: 09.03.2016).
- [14] United States of America: Landsat Science 2015—16. URL: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/?p=3186> (дата обращения: 16.07.2016).
- [15] *Richards J.A., Xiuping J.* Remote Sensing Digital Image Analysis. 5th ed. Berlin: Springer, 2013.
- [16] *Zwenzner H., Voigt S.* Improved estimation of flood parameters by combining space based SAR data with very high resolution digital elevation data // *Earth System Sciences*. 2009. Pp. 567—576.

Для цитирования:

Suárez Kozov N., Trujillo Osorio D., Giraldo Osorio J. Application of remote sensing for monitoring of flood areas (Применение дистанционного зондирования для мониторинга зон затопления) // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 1. С. 66—78. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-66-78



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-79-84

УДК 551.248.2:550.348(55)

Способы оценки сейсмичности территории Сирии

А.И. Дубянский*, Х. Алджабасини†

* Воронежский государственный университет, *Российская Федерация, 394018, Воронеж, Университетская пл., 1*

† Российский университет дружбы народов, *Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6*

История статьи:

Поступила: 12 декабря 2018

Доработана: 21 января 2019

Принята: 30 января 2019

Ключевые слова:

Сирия;
землетрясение;
магнитуда;
глубина;
закон повторяемости

В статье рассмотрены оценки изменения магнитуд сейсмических событий за два года (2005—2006 гг.) по данным сейсмических каталогов. Для этого периода построены и сопоставлены между собой графики закономерности повторяемости землетрясений. Проведен анализ графиков повторяемости ряда зон, построенных при сейсмическом районировании, и определена связь коэффициента A с механизмом очага землетрясения. Выполнено прогнозирование сейсмических событий в регионе на основе сейсмического районирования. Представлено деление территории на районы с разной степенью интенсивности произошедших и ожидаемых землетрясений. Данные сейсмического районирования могут использоваться при проектировании и строительстве сейсмостойких сооружений и для решения других практических задач на сейсмически опасной территории. В этом заключается прикладной аспект сейсмического районирования. Для составления карт сейсмического районирования использованы исторические данные и инструментальные наблюдения за землетрясениями, геолого-тектонические и геофизические карты, а также данные о движении блоков земной коры. Выделены участки возможного возникновения очагов землетрясения (зоны ВОЗ) с различными глубинами. Показано, что наибольшую опасность представляют землетрясения с очагами в пределах земной коры. Приведен статистический анализ по землетрясениям в Сирии с учетом исторических землетрясений на основе летописей. Установлено наличие связей между выявленными землетрясениями и планетарными событиями Земли, в том числе солнечной активностью. Отмечается повышение сейсмической активности в зимнее время.

Введение

Землетрясение — это одно из самых опасных и практически не предсказуемых природных явлений, изучение которого является важнейшей научной и прикладной задачей современности. На-

более актуальной эта проблема является в сейсмически активных регионах, таких как Аравийская плита и, в частности, ее северо-западная часть, на которой располагается территория Сирии. Необходимость получения здесь максимально полной

* Доцент кафедры геофизических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, к.г.-м.н., доцент

† Аспирант департамента недропользования и нефтегазового дела; zaina40@hotmail.com

© Дубянский А.И., Алджабасини Х., 2019



информации о режиме сейсмичности обусловлена большим объемом гражданских строений и промышленных объектов, возведенных и строящихся без необходимого учета возможной интенсивности сейсмических событий.

Данные о сильных исторических землетрясениях относятся еще к VI в., но регулярные инструментальные наблюдения в Сирии начались только в 1995 г., когда была создана Национальная сейсмологическая сеть (SNSN) с центром в г. Дамаске [1—6]. К настоящему времени SNSN состоит из сорока стационарных телеметрических станций, примерно половина которых оснащена акселерометрами Kinematics SSA-I. Этот тип акселерометров ориентирован на регистрацию только сильных природных событий. Остальные оборудованы короткопериодными цифровыми сейсмометрами Kinematics SSI и используются для сейсмического мониторинга. Сейсмометры установлены как на скальных и осадочных грунтах, так и на дамбах и в подвалах зданий.

Информация о сейсмических событиях, полученная этими станциями, легла в основу детального сейсмического районирования территории Сирии. Результаты сейсмического районирования крайне важны для оценки опасности при строительстве многоэтажных зданий и промышленных объектов. При этом стоит отметить недостаточность фактических данных о региональной динамике сейсмического режима во временном масштабе. Эта информация необходима для получения сравнительных характеристик современных сейсмотектонических процессов различных регионов.

В настоящей работе представлены результаты статистического анализа изменений характера сейсмического режима территории Сирии, которые произошли в течении двух лет. Некоторые результаты нашли свое отражение в следующих публикациях [3—5; 7—9]. Данные о тектонических землетрясениях, которые использованы в данной работе, размещены в *Seismological Bulletin from the Syrian National Seismological Network*.

В *Seismological Bulletin from the Syrian National Seismological Network* за последние десять лет (с января 1995 г.) зарегистрировано около 1200 местных событий с магнитудой 3,5 и более. Анализ этих данных показывает, что сейсмичность Сирии за указанное время может быть охарактеризована от небольшой до умеренной, как это и было в предыдущие века по данным исторических летописей. Большинство инструментально определенных

сейсмических событий с магнитудой в интервале 5—6 расположены вдоль Восточно-Анатолийского разлома. В пределах территории выделяется ряд зон слабых событий ($M \leq 4$), таких как южная Пальмира, район Сергая, Южная и Западная части плато Алеппо, регион Басит, а также береговая зона Средиземного моря. В тоже время, по данным Гарвардской сейсмологической обсерватории [4], самые сильные землетрясения на территории Сирии в течение последних двадцати лет произошли на северо-востоке Пальмирид — 20 ноября 1994 г. в 14:31:04 $M = 5,3$, на юго-востоке Пальмирид — 24 декабря 1996 г. в 22:16:32 $M = 5,5$ и на юго-западе Латакии — 29 марта 2006 г. в 22:05:18 $M = 5,0$. Во всех трех случаях тип механизма в очаге определяется как сдвиг.

Анализ сейсмических событий, которые произошли в течение двух лет (2006 и 2007 гг.) на территории Сирии, показал, что только за указанный период времени зарегистрировано 532 землетрясения с магнитудой от 0 до 3,7. В среднем магнитуда составляет 2,18. Гипоцентры землетрясений располагаются на глубинах от 1 до 62 км. Средняя глубина очаговых зон составляет примерно 19 км, что согласно скоростной модели земной коры Сирии [4], соответствует глубинам, на которых пластовые скорости продольных и поперечных волн соответственно равны 6,4 и 3,7 км/с. Это соответствует породам диоритового ряда.

Для оценки характера изменения сейсмической активности во времени построен график помесечного изменения средней магнитуды сейсмических событий (рис. 1). Отмечается относительная периодичность интенсивности тектонических землетрясений. Она заключается в понижении среднего фона магнитуд в летние месяцы. Период составляет примерно один год.

Установлена относительно слабая корреляционная связь магнитуды сейсмических событий с глубиной очаговой зоны (рис. 2). Вполне вероятно, что эта связь при учете более сильных событий будет иметь нелинейный характер [10—15].

В свою очередь глубины гипоцентров определяются тектонической позицией эпицентральных зон. Наиболее сильные землетрясения регистрируются в области разлома Мертвого моря на западе Сирии. Практически все они имеют сдвиговый характер механизма очага. Относительно слабые события, доля которых составляет более 90 %, имеют сбросовый кинематический тип и могут формироваться в широком диапазоне глубин от 12 до 30 км.

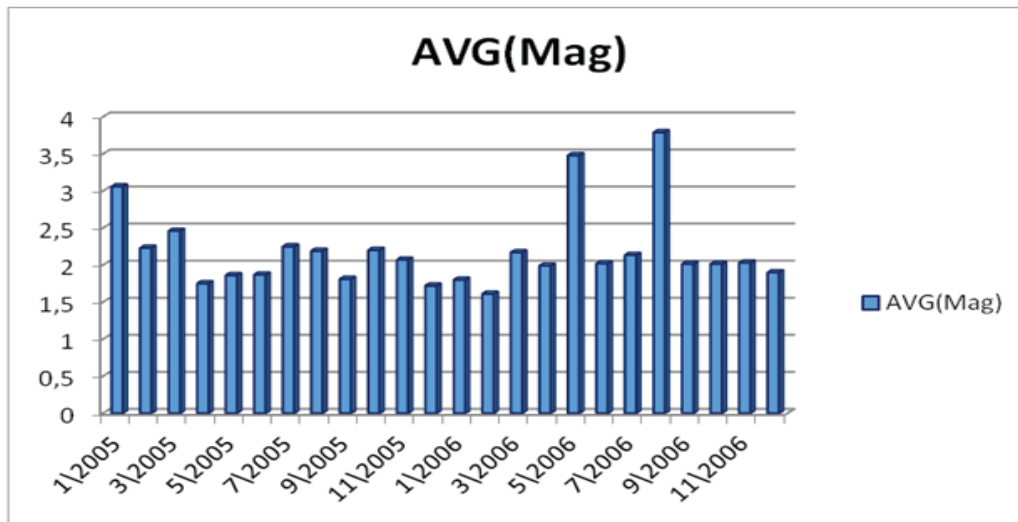


Рис. 1. График изменения среднемесячного значения магнитуд сейсмических событий в течение двух лет (2005—2006 гг.)
[Figure 1. The graph of changes in the average monthly magnitude of seismic events over two years (2005—2006)]

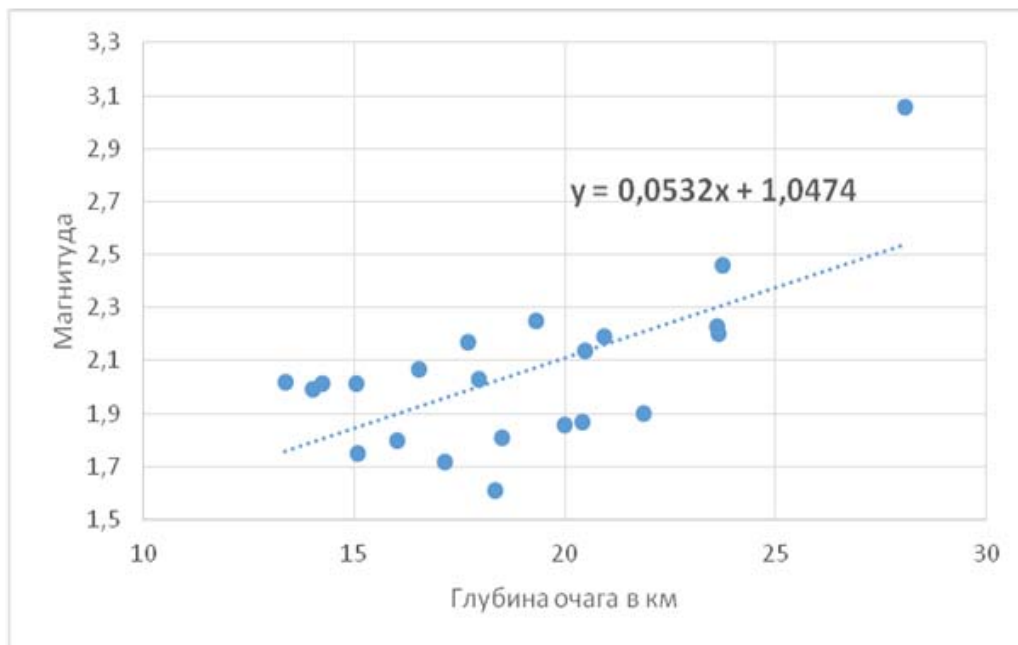


Рис. 2. Зависимость магнитуды сейсмических колебаний от глубины очаговой зоны
[Figure 2. Dependence of seismic vibration magnitude on the depth of the source zone]

По имеющимся данным рассчитаны законы повторяемости землетрясений для 2005 и 2006 гг., графики которых представлены на рис. 3.

Графики свидетельствуют о том, что сейсмичность территории Сирии в течение двух лет практически не менялась. По значению коэффициента A отмечается некоторое увеличение сейсмической активности в 2006 г. В работах [16—19] убедительно показана зависимость знака коэффициента A от вероятного механизма очаговой зоны. Отрицательные значения A указывают на сдвиговой характер де-

формации, который напрямую связан с режимом тектоники плит.

В заключение стоит отметить, что территория Сирии и особенно ее периферийная северо-западная часть является сейсмически активной со средней магнитудой около 2. В то же время относительно редко случаются землетрясения с магнитудой более 5 (3 события за 20 лет). В результате анализа каталогов землетрясений за два года получены оценки сейсмичности всей территории Сирии. Установлена относительная периодичность интен-

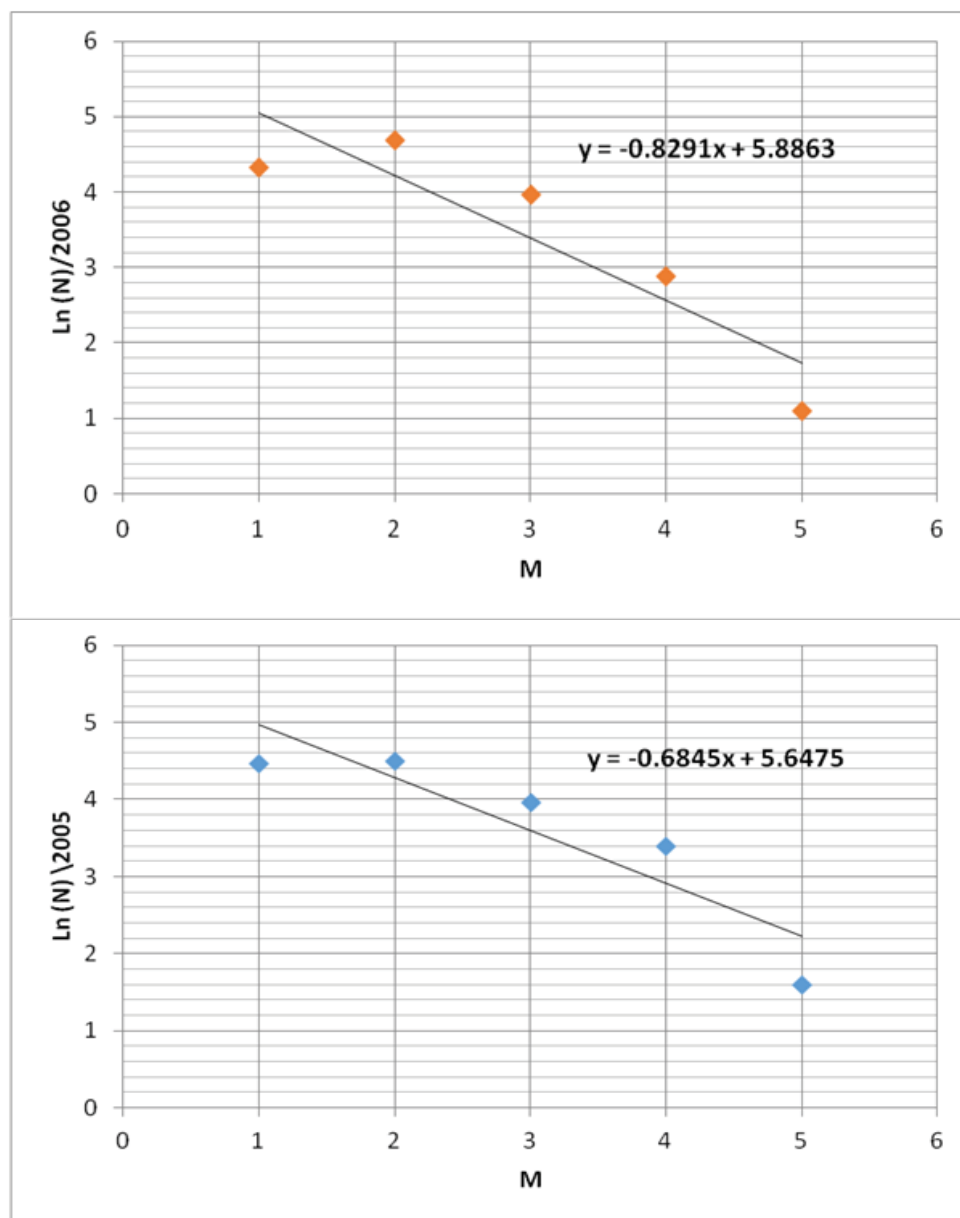


Рис. 3. Законы повторяемости землетрясений на территории Сирии в 2005 и 2006 гг.
 [Figure 3. The laws of the frequency of earthquakes in Syria in 2005 and 2006]

сивности тектонических землетрясений, которая определяется понижением среднего фона магнитуд в летние месяцы. Период спада среднего фона магнитуд составляет примерно один год. Повышение сейсмической активности в зимнее время связано, по-видимому, с активностью солнца и другими процессами планетарного масштаба.

Список литературы

- [1] *Аглонов С.В.* Геодинамика: учебник. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2001. 360 с.
- [2] *Горный В.И., Амар О., Кафри А., Киселев А.В., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Минини Х.* Региональное гео-

логическое строение севера Аравийской плиты и перспективы нефтегазоносности территории Сирии по данным комплексной обработки результатов спутниковых и гравиметрических съемок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 305—312.

- [3] *Девяткин Е.В., Додонов А.Е., Доброва М.Р. и др.* Очерки геологии Сирии // Труды ГИН РАН. Вып. 526. М.: Наука, 2000. 204 с.
- [4] *Дубянский А.И., Алджабасини Х.* Некоторые оценки режима сейсмичности территории Сирии // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 43-й сессии Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского. Воронеж: Научная книга, 2016. С. 74—75.

- [5] *Оленин В.Б., Зверева О.В., Селицкий А.Г.* Нефтегеологическое районирование бассейна Персидского залива // Изв. высш. учеб. завед. Серия: Геология и разведка. 1972. № 2. С. 112–117.
- [6] Seismological Bulletin from the Syrian National Seismological Network. URL: <http://www.nec.gov.sy> (дата обращения: декабрь, 2018).
- [7] *Абрамов В.Ю., Долгинов Е.А.* Новые данные о влиянии лунных фаз на землетрясения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2013. № 2. С. 37–44.
- [8] *Омар Х.М., Татевосян Р.Э., Ребецкий Ю.Л.* Механизмы землетрясений и напряженное состояние земной коры в Сирии // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о земле. 2012. № 2. Вып. 20. С. 139–147.
- [9] *Хаин В.Е., Ломизе М.Г.* Геотектоника с основами геодинамики: учебник для студентов геологических специальностей вузов. М.: Изд-во МГУ, 1995. 480 с.
- [10] *Абрамов В.Ю., Джамус Али Дауд.* Сейсмические данные на шельфе в восточной части Средиземного моря // Инновации и инвестиции. 2017. № 5. С. 150–154.
- [11] *Абрамов В.Ю., Макаровский О.В.* Геологическая интерпретация сейсмических данных. М.: РУДН, 2019. 116 с.
- [12] *Ребецкий Ю.Л., Лукк А.А., Татевосян Р.Э., Быкова В.В.* Определение фокальных механизмов слабых землетрясений и современная геодинамика юга Ирана // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 971–988.
- [13] *Sadovsky M.A., Pisarenko V.F.* Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 92 с.
- [14] Global CMT catalogue (2012). URL: <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> (дата обращения: сентябрь, 2018).
- [15] *Hatem M. El Ssayd, Hussam E. Zaineh, Draji Dojcinovski, Vladimir Mihailov.* Re-Evaluations of Seismic Hazard of Syria // International Journal of Geosciences. 2012. No. 3. Pp. 847–855.
- [16] *Sadooni F.N., Alsharhan A.S.* Stratigraphy, microfacies, and petroleum potential of the Nauddud Formation (Albian-Cenomanian) in the Arabian Jult basin // AAPG Bull. 2003. Vol. 87. No. 10. Pp. 1653–1680.
- [17] *Mohamad Khir Abdul-Wahed, Ibrahim Al-Tahham.* Preliminary outline of the seismologically active zones in Syria // Annals of geophysics. 2010. Vol. 53. No. 4. doi: 10.4401/ag-4683
- [18] *Rawaa Dakkak, Maen Mreish, Mohamad Daoud, George Hade.* Seismological Research Letters. 2005. Vol. 76. No. 4. Pp. 437–445.
- [19] *Sadooni F.N., Alsharhan A.S.* Stratigraphy, microfacies, and petroleum potential of the Nauddud Formation (Albian-Cenomanian) in the Arabian Jult basin // AAPG Bull. 2003. Vol. 87. No. 10. Pp. 1653–1680.

Для цитирования:

Дубянский А.И., Алджабасини Х. Способы оценки сейсмичности территории Сирии // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 1. С. 79–84. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-79-84

Research paper

Ways to assess of seismicity of the territory of Syria

Alexander I. Dubyansky*, Hiba Aljabasini†

* Voronezh State University, *1 University Sq., Voronezh, 394018, Russian Federation*

† Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), *6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation*

Article history:

Received: November 02, 2018

Revised: January 21, 2019

Accepted: January 29, 2019

Keywords:

Syria;
earthquake;
magnitude;
depth;
law of repeatability

The article considers estimates of changes in the magnitudes of seismic events for two years (2005–2006) according to seismic catalogs. For this period, graphs of the law of repeatability of earthquakes were constructed and compared with each other. The analysis of the graphs of the frequency of occurrence of a number of zones built during seismic zoning was carried out, and the relationship between parameter *A* and the earthquake source mechanism was determined. Seismic zoning — the division of the territory into areas with varying degrees of intensity occurred and expected earthquakes. Seismic zoning data is used in the design and construction of earthquake-resistant structures and solving other practical problems in a seismically dangerous area. This is the applied aspect of seismic zoning. For the mapping of seismic zoning, historical data and instrumental observations of earthquakes, geological-tectonic and geophysical maps, as well as data on the movements of blocks of the earth's crust are used.

* Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor

† Postgraduate student of Geology, Department of Geology, Mining and Oil & Gas Engineering; zaina40@hotmail.com

There are areas of possible occurrence of earthquake foci (OEF zones) with different depths. The greatest danger is represented by earthquakes with foci within the earth's crust (at a depth of 3 to 30—50 km). The article provides a statistical analysis of the earthquakes of Syria for two years, taking into account historical earthquakes from the chronicles. The result of the work is the establishment of links between the identified earthquakes and the planetary events of the Earth, including solar activity. There is an increase in seismic activity in winter. Presented research should be used in forecasting future. It is worth noting that the basis for forecasting future natural events is the integration of analytical methods for analyzing data and theoretical ideas about the tectonics of the region in question.

References

- [1] Aplonov SV. *Geodynamics*: textbook. Saint Petersburg: Publishing House of Saint Petersburg University; 2001. (In Russ.)
- [2] Gorny VI, Amir O, Kafri A, Kiselev AV, Kritsuk SG, Latypov IS, Minini Kh. Regional geological structure of the North Arabian plate and prospects of oil and gas potential of the territory of Syria according to the complex processing of satellite and gravimetric survey results. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space]. 2012;9(1): 305—312. (In Russ.)
- [3] Devyatkin EV, Dodonov AE, Dobrova MR et al. Essays on the Geology of Syria. *Tr. GIN RAS. Vol. 526*. Moscow: Nauka Publ.; 2000. (In Russ.)
- [4] Dubyansky AI, Aljabasini H. Some assessment of the regime of seismicity of the territory of Syria. *Theory and practice of geological interpretation of geophysical fields: Proceedings of the 43rd session of D.G. Uspensky the International scientific seminar*. Voronezh: Publishing and printing center “Scientific book”; 2016. p. 74—75.
- [5] Olenin VB, Zverev OV, Selitsky AG. Oil and gas zoning of the Persian Gulf. *Bull. Higher. Stud. Inst. Geology and Exploration Series*. 1972;(2): 112—117.
- [6] *Seismological Bulletin from the Syrian National Seismological Network*. www.nec.gov.sy (accessed: December, 2018).
- [7] Abramov VYu, Dolginov EA. New dates of correlation a moons phases and earthquakes. *Bulletin of the Peoples Friendship University of Russia. Series: Engineering research*. 2013;(2): 37—44. (In Russ.)
- [8] Omar HM, Tatevosyan RE, Rebetsky YL. The mechanism of earthquakes and stress state of earth crust in Syria // *Herald KRAUNTS. Earth Science Series*. 2012;2(20): 139—147.
- [9] Khain VYe, Lomize MG. *Geotectonics with bases of geodynamics tutorial: for students of geological specialties of universities*. Moscow: Moscow State University Publ.; 1995. (In Russ.)
- [10] Abramov VYu, Jamus AD. Seysmicheskiiye given on the shelf in east part of the Mediterranean Sea [Seismic data on the shelf in the Eastern Mediterranean]. *Innovation & Investment*. 2017;(5): 150—154. (In Russ.)
- [11] Abramov VYu, Makarovskiy OV. *Geologicheskaya interpretatsiya seismicheskikh dannykh* [Geological interpretation of seismic data]. Moscow: RUDN Publ.; 2019. (In Russ.)
- [12] Rebetsky YuL, Lucc AA, Tatevosyan RE, Bykova VV. Opredelenie lokal'nykh mekhanizmov slabykh zemletryasenii i sovremennaya geodinamika yuga Irana [Determination of focal mechanisms of weak earthquakes and modern geodynamics of southern Iran]. *Geodynamics and Tectonophysics*. 2017;8(4): 971—988.
- [13] Sadovskiy MA, Pisarenko VF. *Seismicheskiiy protsess v blokovoii srede* [Seismic process in block environment]. Moscow: Nauka Publ.; 1991. (In Russ.)
- [14] *Global CMT catalog* (2012). Available from: <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> (accessed: September, 2018).
- [15] Hatem M, El Ssayd, Hussam E, Zaineh, Draji Dojcinovski, Vladimir Mihailov. Re-Evaluations of Seismic Hazard of Syria. *International Journal of Geosciences*. 2012;(3): 847—855.
- [16] Sadooni FN, Alsharhan AS. Stratigraphy, microfacies, and petroleum potential of the Nauddud Formation (Albian-Cenomanian) in the Arabian Jult basin. *AAPG Bull.* 2003;87(10): 1653—1680.
- [17] Mohamad Khir Abdul-Wahed, Ibrahim Al-Tahham. Preliminary outline of the seismologically active zones in Syria. *Annals of geophysics*. 2010;53(4). doi:10.4401/ag-4683
- [18] Rawaa Dakkak, Maen Mreish, Mohamad Daoud, George Hade. *Seismological Research Letters*. 2005;76(4): 437—445.
- [19] Sadooni FN, Alsharhan AS. Stratigraphy, microfacies, and petroleum potential of the Nauddud Formation (Albian-Cenomanian) in the Arabian Jult basin. *AAPG Bull.* 2003;87(10): 1653—1680.

For citation:

Dubyansky AI, Aljabasini H. Ways to assess of seismicity of the territory of Syria. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(1): 79—84. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-79-84 (In Russ.)



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-85-95

УДК 519.714

Влияние распределения скоростей в закругленном потоке на характер размыва береговых склонов

О.Я. Масликова*, И.И. Грицук†, Д.Н. Ионов‡, В.К. Дебольский§

*†‡§ Институт водных проблем РАН, Российская Федерация, 119333, Москва, ул. Губкина, 3

† Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

‡ Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Российская Федерация, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64

История статьи:

Поступила: 12 октября 2018

Доработана: 21 января 2019

Принята: 30 января 2019

Ключевые слова:

закругление потока;
протivotечение;
вихри;
эрозия почв

Одними из важнейших вопросов речной гидравлики являются движение воды и формирование русла в потоке, имеющем непрямолинейное очертание в плане. В естественных условиях для рек характерно извилистое очертание в плане. Искривление струи также имеет место при делении потока на рукава, впадении притока в реку, слиянии потоков и т.п. Поэтому изучение русловых процессов в реках невозможно без знания закономерностей течения на закруглении русла.

При проектировании гидротехнических сооружений, в том числе мостовых переходов на меандрирующих участках рек, следует знать особенности динамики русла на участках поворота потока. В зимний период такие участки могут быть заужены вследствие замерзания русла, в период оттаивания льда забиты ледовыми обломками. Сужение канала вызывает возрастание числа Рейнольдса и перераспределение эпюры скоростей на рассматриваемом участке, что вызывает изменение в характере размыва.

Характер распределения скоростей и образования вихрей исследовался в лабораторных условиях на установке, создающей закругленные потоки. Показано, что при критических числах Рейнольдса в закругленном потоке у внутреннего берега возникает вихревое протivotечение. Анализировалось воздействие данного распределения скоростей на характер размыва различных склонов закругленного потока.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке государственной программы № 0147-2019-0001 (регистрационный № АААА-А18-118022090056-0), а также при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-05-00178.

* Старший научный сотрудник лаборатории динамики русловых потоков и ледотермики, к.т.н.

† Доцент департамента строительства, Инженерная академия; старший научный сотрудник лаборатории динамики русловых потоков и ледотермики; доцент кафедры гидравлики, к.т.н., доцент; griksuk_ii@rudn.ru

‡ Младший научный сотрудник лаборатории динамики русловых потоков и ледотермики, к.т.н.

§ Заведующий лабораторией динамики русловых потоков и ледотермики, д.т.н., профессор

© Масликова О.Я., Грицук И.И., Ионов Д.Н., Дебольский В.К., 2019



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Преобладающее количество рек имеют непрямолинейные очертания из-за влияния турбулентности течений потока на русло. Для моделирования формирования и эволюции меандров возможны как основанные на наблюдениях [1; 2], так и физически обоснованные [3] модели эрозии берегов. Модели, основанные на наблюдениях, предполагают скорость размывания берега, пропорциональную прибрежной скорости потока. Физически основанные модели рассчитывают перенос донных отложений и скорости эрозии берегов для определения отступления береговой линии канала. При этом коэффициент эрозии в натуральных моделях является эмпирическим и не отражает геометрию размыва в некоторых местах, являющихся естественными меандрами. Такие модели могут быть эффективными для прогнозирования долгосрочного поведения извилистых рек [4—6]. Физические модели используются для прогноза скорости размывания берега в любых местах естественного извилистого канала при известных входных данных, таких как поле скоростей, геометрия берега и материал слагающего склон вещества.

Изменение геометрии меандров реки проявляется в размыве на одном склоне и дне реки и осадконакоплении на другом, что ставит под угрозу безопасность речных сооружений. В [7] была создана эмпирическая модель анализа влияния изменения флуктуаций расхода на изменения геометрии меандра реки. Эта модель была построена с учетом функций седиментации и размыва. Было показано, что процесс эрозии является доминирующим в перестроении берегов меандрирующего потока.

Начало меандрирования является результатом сложного взаимодействия между потоком, донными отложениями и береговым материалом. В [8] для моделирования зарождения и развития процессов меандрирования каналов была разработана усредненная по глубине двумерная гидродинамическая модель, демонстрирующая процесс береговой эрозии, состоящей из двух интерактивных процессов: основная эрозия и обрушение. Для случая основной эрозии в работе выведено уравнение движения частиц грунта гидродинамическими силами. Процесс обрушения воспроизводился с помощью лабораторных экспериментов для моделирования зарождения и развития несвязных извилистых каналов.

Для моделирования сложных гидравлических процессов меандров реки в [9] в качестве натурной

модели изучалась река Брантас, которая протекает на протяжении 320 км вокруг горы Келуд действующего вулкана и является идеальной для моделирования движения меандров. Результаты этого анализа позволили выявить основные закономерности течения потока на повороте. Равномерное течение в меандрах прямоугольного или произвольного сечений было рассчитано в [10], где достаточно хорошо описано спиралевидное движение струй, вызванное геометрией закругленного русла. Спиральный поток перемещает частицы взвеси к центру кривизны, в то время как поперечный уклон дает движение в противоположном направлении.

В [11] представлена и проанализирована простая математическая модель для моделирования речных извилистых процессов, которая является линейной для прогнозирования поля течения и рельефа русла реки, при этом геометрические нелинейности возникают из уравнения береговой эрозии. Модель потока и русла реки получается путем полного объединения поля потока, топографии русла и переноса отложений и учитывает (приблизительно) конвекцию импульса вторичного потока.

Статья [12] представляет расширенную двумерную (2D) численную модель водного потока и массопереноса в меандрирующих каналах. Гидродинамическая модель основана на решении усредненных по глубине уравнений непрерывности и импульса, в которых плотность потока изменяется в зависимости от концентрации переносимой массы. Основным уравнением для модели переноса массы является усредненное по глубине уравнение конвекции и диффузии. Сравнение моделируемой скорости и высоты поверхности воды с измерениями показало, что включение дисперсионных членов улучшило результаты моделирования.

Трехмерный анализ [13] определяет как подвижность частиц, так и средний угол ориентации движущихся частиц донных отложений в изгибах меандра. Показано, что при одинаковом напряжении сдвига слоя и угле ориентации прилегающего слоя на боковом уклоне частицы разной крупности движутся в разных направлениях. Этот механизм сортировки был проверен в крутых извилистых изгибах Фолл-Ривер, штат Колорадо. Обширный набор полевых данных включает в себя измерения переноса донных отложений по долям от 0,125 до 32 мм. Измерения в двух изгибах меандра подтверждают теоретическую модель: частицы размером менее d_{50} преимущественно перемещаются вверх по

точечному стержню, а частицы более грубые, чем d_{50} , движутся в направлении тальвега. Измеренный угол отклонения между средней траекторией частиц размером 0,125 и 32 мм достигает 20° вблизи максимума изгиба.

Полностью трехмерная негидростатическая модель была применена для расчета полей скоростей и морфодинамических процессов в лабораторном потоке [14]. Данные экспериментов были использованы при изучении эффективности различных подходов для определения переноса отложений. Первоначальная формула Ван Рейна для однородных отложений сравнивалась с двумя усовершенствованными формулами неоднородных отложений, в которых учитывалось взаимодействие между зернами различного размера. Это исследование показало, что настоящая численная модель способна предсказать изменения морфодинамического слоя в потоке с неоднородными отложениями.

Из отечественных исследователей, изучающих меандрирующие реки, следует отметить [15]. В статье приводится географический взгляд на меандрирующие палеореки. Те же авторы [16; 17] в докладах в качестве основных причин меандрирования северных рек называют условия рельефа и климата: большую длительность зимнего периода в совокупности с низкими температурами, приводящими к обильным снегопадам, а следовательно, к значительному снеготаянию; невысокие значения годовых испарений; большие коэффициенты стока из-за наличия многолетней мерзлоты.

Изучение процесса свободного меандрирования было рассмотрено в [18], где сделан прогноз по изменению условий работы сооружений перехода в ходе развития русловых деформаций.

Во всех имеющихся на данный момент работах наблюдения приведены с географической точки зрения, без физического описания процесса. В работе [19] была получена система уравнений для расчета скорости размыва вогнутого берега и размыва плюс намыва противоположного, выпуклого берега, а также предложена модель, объединяющая воздействие потока на закругленные берега, в том числе в процессе оттаивания породы. В нашей работе мы рассмотрим основные особенности закругленного потока с целью дальнейшего применения к условиям криолитозоны для случая суженного в результате замерзания русла, в котором вследствие увеличения числа Рейнольдса происходит образование вихрей и противотечений.

1. Поперечные циркуляции

Как на прямолинейных участках рек, так и на поворотах можно наблюдать влияние непараллельноструйного течения потока. Русский ученый Н.С. Лелявский [20] указывал на это в конце прошлого столетия и объяснял следующим образом. Под влиянием высоких скоростей на поверхности воды на стрежне со стороны втягивается струя, приводящая к некоторому повышению уровня в центре потока. Из-за этого создаются два циркуляционных течения в плоскости, по нормали к направлению течения, которые расходятся у дна (рис. 1, а). В совокупности с поступательным движением эти течения образуют винтообразную форму движения. Течение на поверхности, устремленное к стрежню, Лелявский назвал сбойным, а расходящееся — веерообразным.

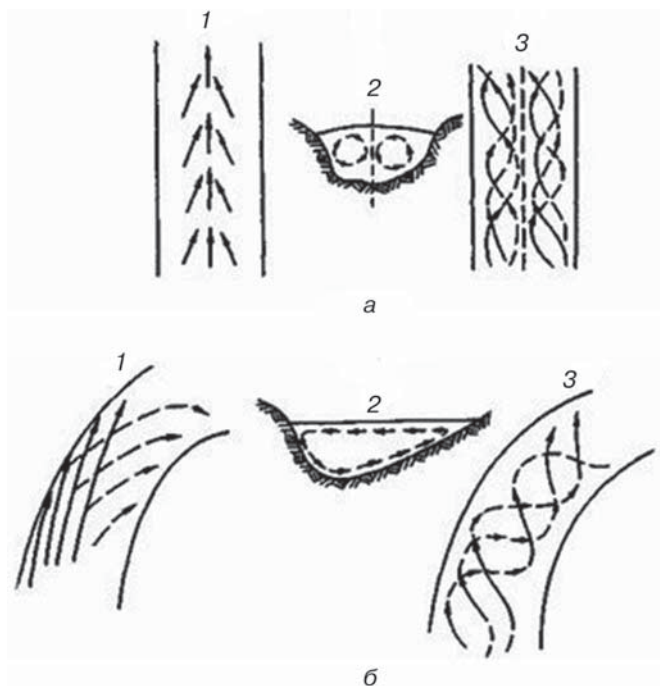


Рис. 1. Циркуляционные течения (по Н.С. Лелявскому [20]): а — прямолинейный участок русла; б — изогнутый участок русла; 1 — план поверхностных и донных струй; 2 — циркуляционные течения в вертикальной плоскости; 3 — винтообразные течения
[Figure 1. Circulating currents (according to N.S. Lelyavsky [20]): а — straight section of the channel; б — curved section of the channel; 1 — plan of surface and bottom jets; 2 — circulation flows in a vertical plane; 3 — helical flows]

Встречаясь с вогнутой частью берега на прямолинейных участках реки струи от него отбрасываются [21]. Водные массы при встрече с этими отраженными струями, обладающими низкими скоростями, накладываются на водные массы, переносимые накатывающимися на них следующими

струями, увеличивая уровень отметки воды у вогнутого берега. Все это приводит к перекосу поверхности воды, и струи, располагающиеся у вогнутого берега, спускаются по откосу и перемещаются в придонных слоях к выпуклому противоположному берегу. Так на непрямолинейных участках рек формируется циркуляционное течение (рис. 1, б).

А.И. Лосиевский изучал особенности внутренних течений потока в лабораторных условиях [22]. В процессе исследований им были определены четыре типа внутренних течений и установлена зависимость формы циркуляционных течений от соотношения глубины и ширины потока (рис. 2). Двумя симметричными циркуляциями обладают I и II типы. I тип характеризуется расхождением струй у дна и сходимением у поверхности, что присуще водотокам с неглубоким и широким руслом при незначительном воздействии берегов на поток. При II типе донные струи направлены от берегов к центру, что свойственно потокам с большой глубиной и скоростями. Тип III с односторонней циркуляцией формируется в руслах треугольной формы. При переходе типа I в тип II образуется IV промежуточный тип. При этом струи в центре потока могут быть расходящимися или сходящимися, а у берегов соответственно, сходящимися и расходящимися. Последующее изучение циркуляционных течений продолжили М.А. Великанов [23], В.М. Маккавеев, А.В. Караушев и др. Формирование поперечных течений на изгибе русла объясняется возникающей центробежной силой инерции и связанным с ней поперечным уклоном поверхности воды. Данная сила развивается на закруглениях и на разных глубинах различна.

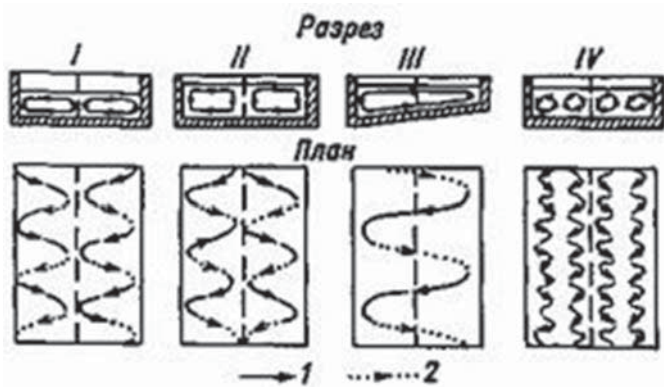


Рис. 2. Схема внутренних течений (по А.И. Лосиевскому [22]):
1 — поверхностная струя; 2 — донная струя
[Figure 2. Diagram of internal currents (according by A.I. Losievsky [22]):
1 — surface jet; 2 — bottom jet]

С изменением глубины в сторону дна уменьшается продольная скорость, а следовательно, и центробежная сила (рис. 3, а).

В зависимости от направления излучины отклоняющая сила Кориолиса или усиливает, или ослабляет поперечные течения на закруглении. Эта же сила возбуждает поперечные течения на прямолинейных участках.

При низких уровнях на закруглении циркуляционные течения почти не выражены. С повышением уровней, увеличением скорости и центробежной силы циркуляционные течения становятся отчетливыми. Скорость поперечных течений обычно мала — в десятки раз меньше продольной составляющей скорости. Описанный характер циркуляционных течений наблюдается до выхода воды на пойму. С момента выхода воды на пойму в реке создаются как бы два потока — верхний, долинного направления, и нижний, в коренном русле. Взаимодействие этих потоков сложно и еще мало изучено.

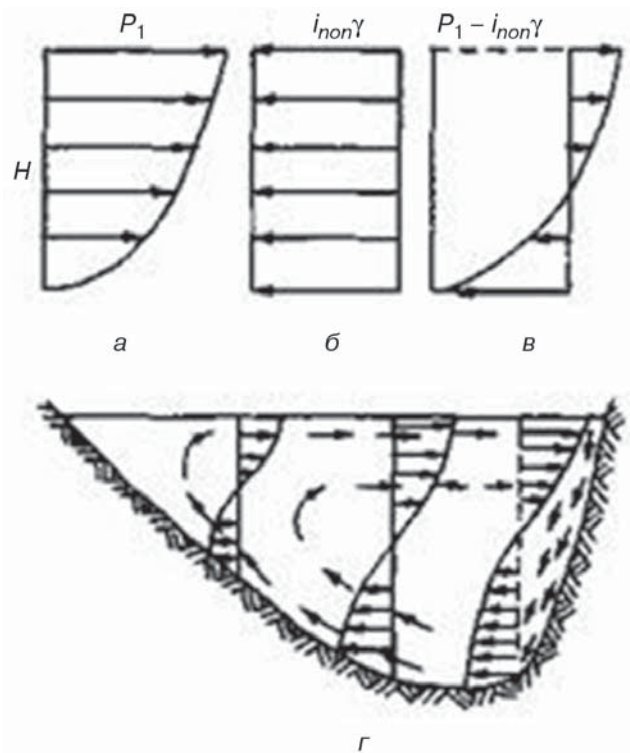


Рис. 3. Схема сложения сил, вызывающих циркуляцию:
а — изменение по вертикали центробежной силы P_1 ;
б — избыточное давление; в — результирующая эпюра действующих на вертикали сил центробежной и избыточного давления; г — поперечная циркуляция [23]
[Figure 3. Circulation of forces causing circulation:
а — is the vertical change in the centrifugal force P_1 ; б — is the overpressure; в — is the resulting plot of the centrifugal and overpressure forces acting on the vertical; г — is the transverse circulation [23]]

В современной литературе по динамике русловых потоков [24] приводится более строгое объяснение возникновения поперечных циркуляций в речном потоке. Их происхождение связывается с механизмом передачи на элементарные объемы воды в потоке действия кориолисова ускорения посредством градиента давления, обусловленного поперечным уклоном (и постоянного на вертикали), и разности касательных напряжений, вызванных на гранях элементарных объемов воды различиями в скоростях потока по вертикали. Аналогичную кориолисову ускорению роль выполняет на повороте русла центростремительное ускорение.

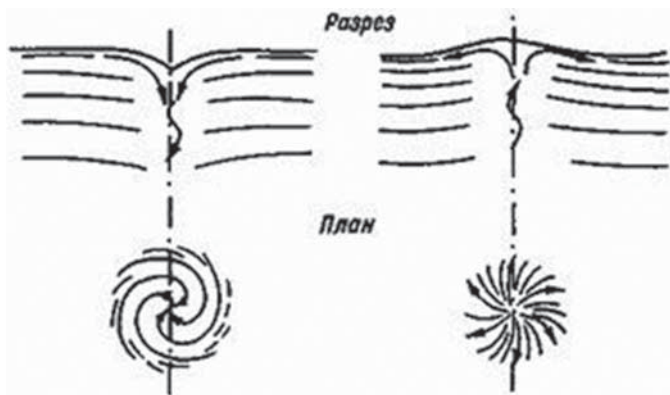


Рис. 4. Схема вихрей с вертикальными осями (по К.В. Гришанину [24])

[**Figure 4.** Vortex scheme with vertical axes (by K.V. Grishanin [24])]

Помимо поперечных циркуляций, в потоке наблюдаются вихревые движения с вертикальной осью вращения (рис. 4).

Одни из них подвижны и неустойчивы, другие стационарны и отличаются большими поперечными размерами. Чаще они возникают в местах слияния потоков, за крутыми выступами берегов, при обтекании некоторых подводных препятствий и т.д.

Поворот вызывает перераспределение скоростей по ширине и вертикалям живого сечения. На рис. 5 и 6 показано направление векторов скорости и линий тока на закруглении, полученное в программе FemLab. Анализ показывает [25], что в результате появления поперечного уклона водной поверхности в начале закругления величина максимальной скорости смещается к внутреннему, выпуклому берегу. В закруглении из-за обмена количеством движения между плановыми струями водного потока, вызванного поперечной циркуляцией, скорости перераспределяются, и величина максимальной скорости постепенно перемещается к наружному, вогнутому берегу. Там же, где поперечный уклон и центробежная сила уже не имеют влияния, т.е. на выходе из закругления, величины максимальных скоростей располагаются на большом протяжении у самого продолжения вогнутого берега.

При закруглении потока линии тока упираются во внешний берег, усиливают друг друга и таким образом скорость на стрежне увеличивается. По за-

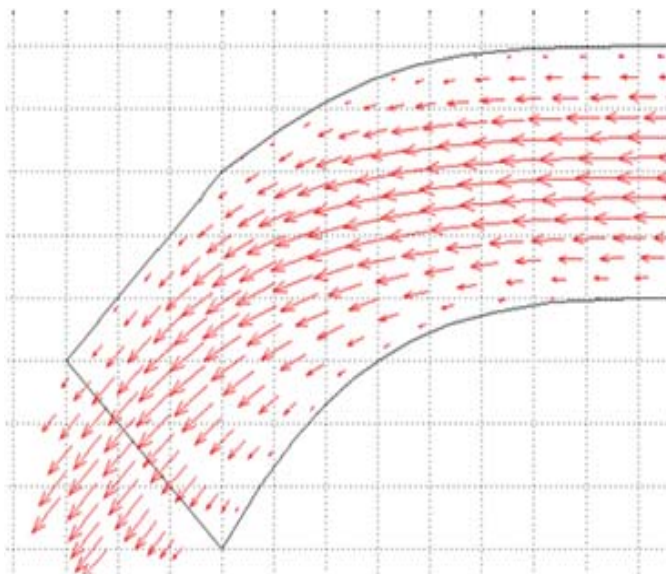


Рис. 5. Направления результирующих векторов скорости потока на закруглении
[**Figure 5.** The directions of the resultant flow velocity vectors at the rounding]

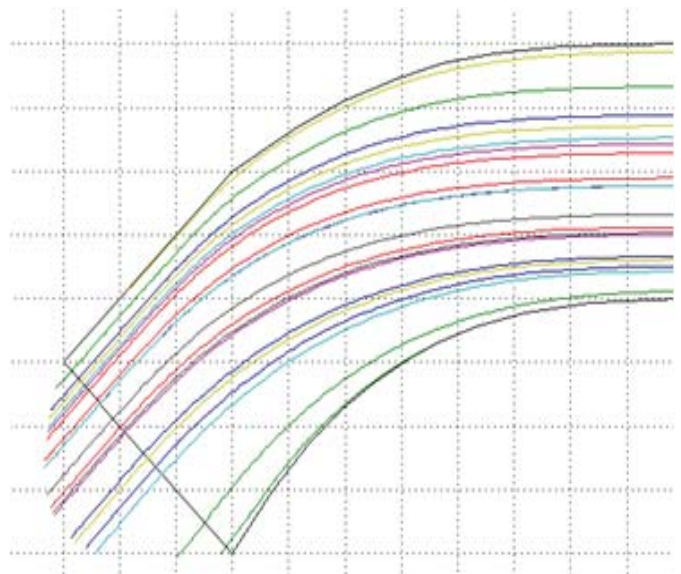


Рис. 6. Линии тока (одинаковых скоростей) в потоке на закруглении
[**Figure 6.** Current lines (same speeds) in flow at rounding]

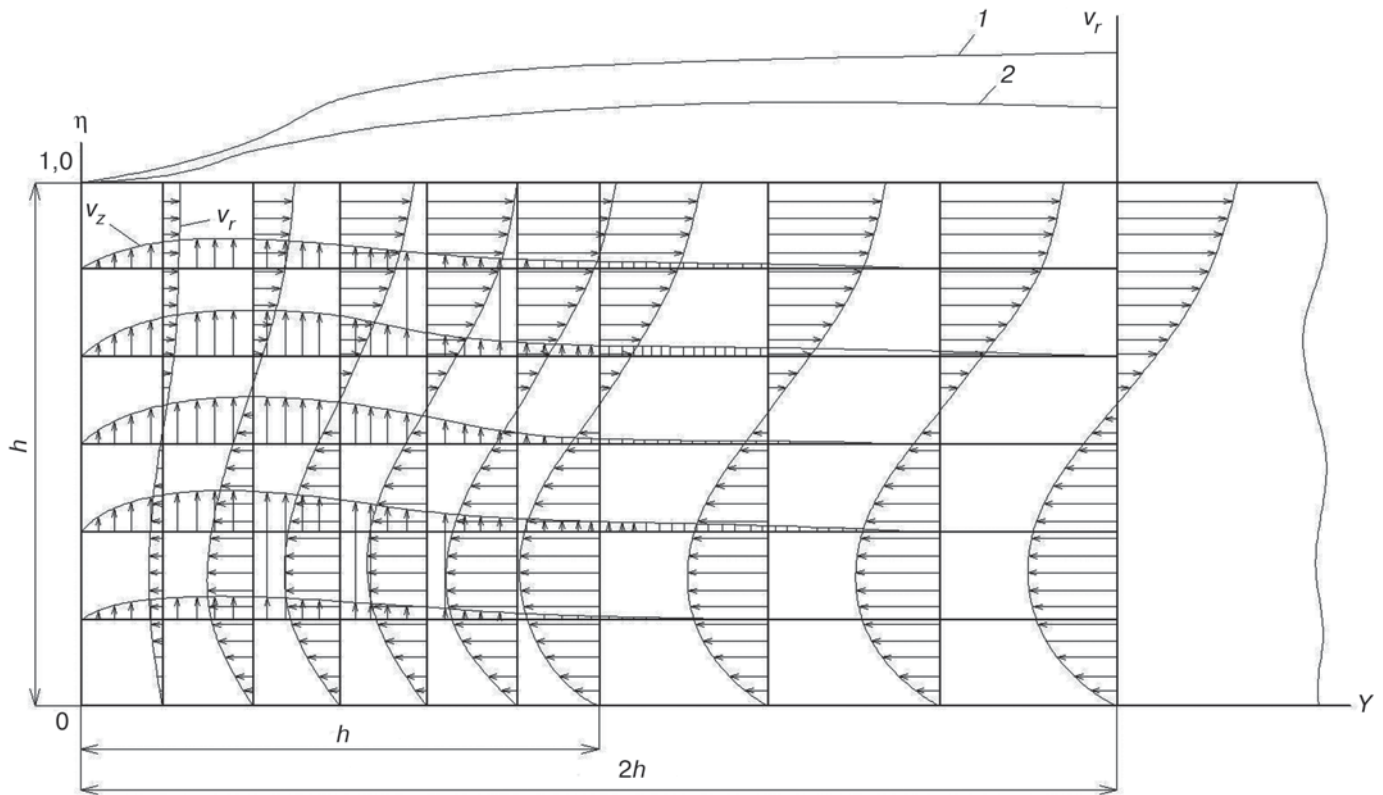


Рис. 7. Распределение скоростей v_r и v_z (в цилиндрических координатах) по сечению на повороте русла:
 1 — придонная скорость; 2 — поверхностная скорость
[Figure 7. The velocity distribution v_r and v_z (in cylindrical coordinates) over the cross section at the turn of the channel:
 1 — bottom velocity; 2 — surface speed]

кону Бернулли расход остается прежним, и, как следствие, у противоположного, внутреннего берега возникают противотечения, которые возрастают с возрастанием числа Рейнольдса.

По [25] в реальном закругленном потоке всегда появляются поперечные составляющие скорости v_r и v_z , и все движение принимает винтообразный характер (рис. 7).

В итоге на формирование русел рек и перенос наносов значительное влияние оказывают как вихревые движения, так и поперечные циркуляции.

2. Вихри, вызванные отрывом пограничного слоя на повороте русла

При возрастании скорости потока (и, следовательно, числа Рейнольдса) движение на закруглении можно считать обтеканием препятствия, подразумевая под препятствием внутренний, выпуклый берег. Так как геометрия потока в плане имеет вид перевернутой трапеции, то трехмерное поле скоростей выглядит сложным образом.

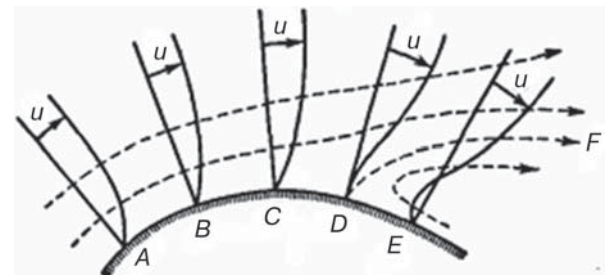


Рис. 8. Схематическая форма линий тока (пунктир) и профилей скорости (сплошные линии) над различными точками при обтекании прямого цилиндра
[Figure 8. The schematic shape of the streamlines (dotted line) and velocity profiles (solid lines) above different points when flowing around a straight cylinder]

Формирование турбулентного следа в обтекающем потоке часто связано с тормозящим влиянием отрицательного продольного градиента давления [26]. Если рассмотреть обтекание прямого круглого цилиндра перпендикулярным к оси потока без циркуляции, то можно говорить о том, что вне пограничного слоя происходит безвихревое движение, а жидкость принимается идеальной.

Линии тока этого потенциального движения максимально сгущаются над верхней точкой цилиндра (точка C), где касательная скорость и достигает максимума. Вследствие известного уравнения Бернулли $\frac{U^2}{2} + \frac{p}{\rho} = \text{const}$ давление над точкой C во внешнем потоке достигает минимума, так что на участке AC оно возрастает, а на участке CE падает. Такие же изменения давления вдоль поверхности тела имеют место и в пограничном слое (так как поперек пограничного слоя давление почти не меняется). Следовательно, на участке CE жидкость в пограничном слое должна двигаться по направлению возрастания давления, что приводит к ее торможению. Наиболее сильно это торможение сказывается, конечно, на частицах жидкости, движущихся около самой поверхности обтекаемого тела, т.е. обладающих наименьшей скоростью. В некоторой точке D вниз по потоку от точки C эти частицы останавливаются, а за точкой D даже двигаются вспять по сравнению с более удаленными от поверхности цилиндра и поэтому еще не заторможенными частицами. Образующийся у поверхности тела за точкой D возвратный поток оттесняет внешнее течение от поверхности цилиндра — происходит так называемый отрыв пограничного слоя от обтекаемой поверхности с образованием в жидкости поверхности раздела DF . Если скорость U внешнего потока достаточно быстро убывает за точкой C , то такой отрыв пограничного слоя обязательно будет иметь место. Если пограничный слой до отрыва был ламинарным, то после отрыва он ведет себя как свободная струя в затопленном пространстве и быстро становится турбулентным (при заметно меньших Re , чем не отрывавшийся пограничный

слой, так как наличие стенки действует на течение стабилизирующим образом). Поверхность раздела DF , являющаяся поверхностью тангенциального разрыва скорости, весьма неустойчива и быстро свертывается в один или несколько вихрей. В области FDE за поверхностью раздела около цилиндра образуется крупный вихрь, второй такой же вихрь образуется в нижней части цилиндра. Эти вихри попеременно отрываются от поверхности цилиндра, уносятся вниз по течению и постепенно рассеиваются, на их месте образуются новые вихри.

В результате за телом образуется турбулентный след, в котором движение является завихренным, в то время как вне этого следа и вне пограничного слоя движение является безвихревым (т.е. потенциальным). Действительно, жидкость вне пограничного слоя можно считать идеальной, а значит, при ее движениях циркуляция скорости вдоль любого замкнутого жидкого контура сохраняется, следовательно, при установившемся движении имеет место постоянство вихря скорости вдоль линий тока. По этой причине область завихренного турбулентного движения вдали от поверхности тела может возникнуть только при выходе линий тока из пограничного слоя (в котором движение становится завихренным вследствие действия вязкости) наружу, т.е. лишь в связи с непосредственным перемещением жидкости из пограничного слоя в удаленные части пространства.

Также в [27] было показано, что в областях торможения потока происходит отрыв пограничного слоя и образование вихрей. Вихри под действием модифицированной силы Жуковского поднимаются вверх, на порядок увеличивая интенсивность массообмена.

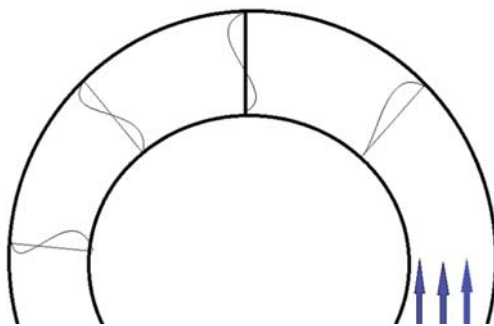


Рис. 9. Эпюры поверхности скорости в потоке на закруглении (в круговом лотке)
[Figure 9. Plots of the surface velocity in the flow at the rounding (in a circular tray)]

3. Лабораторные эксперименты

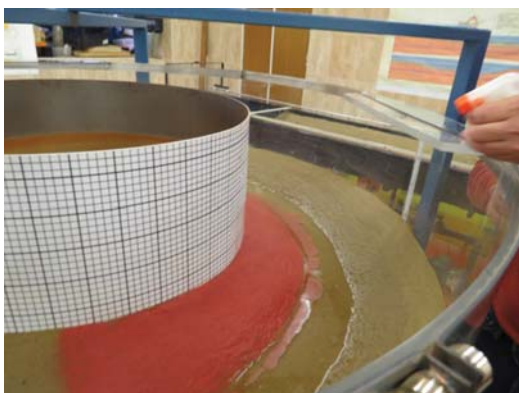
Были проведены эксперименты по определению размыва внутреннего и внешнего берегов в круговом лотке (внутренний радиус закругления 35 см, внешний радиус закругления 75 см). Органические примеси, содержащиеся в материале (песке), позволили визуализировать поверхностную эпюру скорости участка потока (рис. 9).

У внутренней границы потока наблюдалось противотечение с образованием единичных вихрей. После удаления воды было видно, что воздействие потока на разные склоны неодинаково — на внешнем, вогнутом склоне при скорости потока выше критической образовались выраженные гряды, тогда как на внутреннем склоне гряды не образовались, таким образом, скорости на внутреннем склоне были достаточными для размыва, но недостаточными для образования гряд. Нижняя часть внутреннего (окрашенного) склона размывалась больше, чем верхняя, что свидетельствует об увеличении модуля скорости с постоянным градиентом от поверхности ко дну на этом участке. Все это позволяет сделать вывод о характере распределения скоростей в закругленном потоке.

4. Транспортирующая способность потока на закруглении

При возрастании числа Рейнольдса на закруглении неизбежно возникают противотечения, что сказывается на характере переносимых наносов. Принимая во внимание изменение льдистости, В.К. Дебольский [28] вывел зависимость транспортирующей способности водного потока:

$$S_{\text{тр}} = 2,4 \cdot 10^{-3} \frac{U^3}{ghw}, \quad (1)$$



где S — транспортирующая способность потока; U — средняя скорость потока; h — глубина потока; w — гидравлическая крупность незамерзшего материала.

В общем случае распределение скоростей по ширине (в цилиндрических координатах) при входе в закругление, очерченное по дуге круга, выражается формулой

$$v_{\Theta} = \frac{1}{r} \sqrt{\int r^2 \frac{d(v_0^2)}{dr} dr + c}, \quad (2)$$

где r — больший радиус; v_0 — средняя по вертикали скорость перед закруглением; v_{Θ} — соответствующая ей скорость на закруглении; Θ — угол, отсчитываемый от начала закругления.

Постоянную величину c можно определить из условия неразрывности, т.е. из равенства расходов Q жидкости перед закруглением и на нем:

$$Q = \int_{r_{\text{вн}}}^{r_{\text{нар}}} v_0 h dr = \int_{r_{\text{вн}}}^{r_{\text{нар}}} \frac{h}{r} \sqrt{\int r^2 \frac{d(v_0^2)}{dr} dr + c}, \quad (3)$$

где $r_{\text{вн}}$ и $r_{\text{нар}}$ — радиусы выпуклого и вогнутого берегов соответственно; h — глубина по вертикали.

Заключение

По результатам физического моделирования с учетом скоростей на поверхности водотока получена система уравнений, описывающая транспортирующую способность водного потока в условиях льдистости на участке поворота русла. Эта система применима в случае ламинарного потока.

В природных условиях в зимний период для таких участков характерно сужение потока вследствие частичного промерзания русла, образования шугохода или затора. В результате скорости потока уве-



Рис. 10. Вид русла до начала эксперимента и после
[Figure 10. View of the channel before the experiment and after]

личиваются, а сам поток становится турбулентным. Лабораторные эксперименты, проведенные в круговой установке гидравлической лаборатории РУДН, имитирующей участок поворота русла, показали, что в случае увеличения скоростей потока, входящих в закругление, или увеличения числа Рейнольдса в потоке неизбежно возникают вихревые движения и противотечения у внутреннего склона. При этом поле скоростей приобретает иной вид, что неизбежно сказывается на характере размыва русла. Данная задача требует дальнейших исследований и проработки.

Список литературы

- [1] *Ikeda S., Parker G., Sawai K.* Bend theory of river meanders. Part 1. Linear development // *Journal of Fluid Mechanics*. 1981. Vol. 112. Pp. 363–377.
- [2] *Ikeda S., Nishimura T.* Flow and bed profile in meandering sand-silt rivers // *Journal of Hydraulic Engineering*. 1986. Vol. 112. No. 7. Pp. 562–579.
- [3] *Osman M.A., Thorne C.R.* Riverbank stability analysis. I: Theory // *Journal of Hydraulic Engineering*. 1988. Vol. 114. No. 2. Pp. 134–150.
- [4] *Parker G., Andrews E.D.* On the time development of meander bends // *Journal of Fluid Mechanics*. 1986. Vol. 162. Pp. 139–156.
- [5] *Sun T., Meakin P., Jossang T., Schwarz K.* A simulation model for meandering rivers // *Water Resources Research*. 1996. Vol. 32. Pp. 2937–2954.
- [6] *Lancaster S.T., Bras R.L.* A simple model of river meandering and its comparison to natural channels // *Hydrological Processes*. 2002. Vol. 16. No. 1. Pp. 1–26.
- [7] *Kuntjoro K., Bisri M., Masrevaniah A., Suharyanto A.* Modeling of discharge fluctuation influence on river meandering geometry change // *International Journal of Academic Research. Part A*. 2012. Vol. 4. No. 6. Pp. 189–196.
- [8] *Duan J.G., Julien P.Y.* Numerical simulation of the inception of channel meandering // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2005. Vol. 30. Pp. 1093–1110.
- [9] *Kuntjoro K., Didik Harijanto.* The Movement of the Regularly River Meanders on Constant Discharge // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018. Vol. 9. No. 6. Pp. 619–629.
- [10] *Engelund F.* Flow and bed topography in channel bend // *Journal of Hydraulic Division*. 1974. Vol. 100. No. 11. Pp. 1631–1648.
- [11] *Crosato A.* Simulation of meandering river processes // *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering / Delft University of Technology*. Delft, 1990.
- [12] *Duan J.G.* Simulation of flow and mass dispersion in meandering channels // *Journal of Hydraulic Engineering*. 2004. Vol. 130. No. 10. Pp. 964–976.
- [13] *Julien P.Y., Anthony D.J.* Bedload motion and grain sorting in a meandering stream // *Journal of Hydraulic Research*. 2002. Vol. 40. No. 2. Pp. 125–133.
- [14] *Olsen N.R.B.* Three-dimensional CFD modelling of self-forming meandering channel // *Journal of Hydraulic Engineering*. 2003. Vol. 129. No. 5. Pp. 366–372.
- [15] *Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К.* Позднеледниковые палеорусла рек Западной Сибири // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2008. № 2. С. 67–75.
- [16] *Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К.* Речной сток на Восточно-Европейской равнине за последние 20 тысяч лет и проблема изменения уровней южных морей // *Гидрологические изменения*. Сб. 145. Кодекс, 2018. С. 144–168.
- [17] *Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К.* Снижение стока рек равнин Северной Евразии в оптимум голоцена // *Водные ресурсы*. 2012. Т. 39. № 1. С. 40–53.
- [18] *Жолудев Д.М., Плотников А.Н., Слабожанин Г.Д.* Изучение процессов свободного меандрирования рек // *Избранные доклады 64-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых*. Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2018. С. 790–792.
- [19] *Масликова О.Я.* Деформации мерзлых склонов рек на повороте русла при наличии движущихся судов // *Строительство: наука и образование*. 2018. Т. 8. Вып. 3. Ст. 4. С. 54–66.
- [20] *Лелявский Н.С.* О речных течениях и формировании речного русла // *Труды 2-го Съезда инженеров-гидротехников в 1893 г.* СПб., 1893. (Вопросы гидротехники свободных рек. М.: Речиздат, 1948. С. 18–136.)
- [21] *Давыдов Л.К., Дмитриева А.П., Конкина Н.Г.* Общая гидрология. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 462 с.
- [22] *Лосиевский А.И.* Лабораторные исследования процессов образования перекаатов // *Труды ЦНИИВТ*. 1934. Вып. 36. 98 с.
- [23] *Великанов М.А.* Гидрология суши. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 455 с.
- [24] *Гришанин К.В.* Основы динамики русловых потоков. М.: Транспорт, 1990. 320 с.
- [25] *Розовский И.Л.* Движение воды на повороте открытого русла. Киев: Изд. АН УССР, 1957. 188 с.
- [26] *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. Часть I. М.: Наука, 1965. 640 с.
- [27] *Мельникова О.Н., Петров В.П., Масликова О.Я.* Экспериментальное исследование массообмена в придонном слое открытого потока со стационарными волнами // *Вестник МГУ. Серия 3: Физика. Астрономия*. 1994. Т. 35. № 5. С. 59–66.
- [28] *Дебольский В.К. и др.* Динамика русловых потоков и литодинамика прибрежной зоны моря. М.: Наука, 1994. 303 с.

Для цитирования:

Масликова О.Я., Грищук И.И., Ионов Д.Н., Дебольский В.К. Влияние распределения скоростей в закругленном потоке на характер размыва береговых склонов // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2019. Т. 20. № 1. С. 85–95. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-85-95

Influence of speed distribution in a rounded flow on the character of slopes erosion

O.Ya. Maslikova*, I.I. Gritsuk†, D.N. Ionov‡, V.K. Debolskiy§

*†‡§ Water Problems Institute of Russian Academy of Sciences (IWP RAS), 3 Gubkina St., Moscow, 119333, Russian Federation

† Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation

‡ Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation

Article history:

Received: October 12, 2018

Revised: January 21, 2019

Accepted: January 29, 2019

Keywords:

flow heading;
counterflow;
vortex;
soil erosion

One of the most important issues of river hydraulics is the movement of water and the formation of a channel in a stream that has a non-straight-line outline in the plan. Under natural conditions for rivers characteristic winding shape in the plan. The curvature of the jet occurs when the flow is divided into sleeves, at the inflow into the river, the confluence of flows, etc. Therefore, the study of channel processes in rivers is impossible without knowledge of the flow patterns at the curve of the channel.

When designing hydraulic structures, including bridge crossings on the meandering sections of rivers, one should know the features of the dynamics of the channel in the sections of the flow turning. In winter, such areas may be narrowed due to the freezing of the channel, and during the period of ice thawing they are clogged with ice fragments. The narrowing of the canal causes an increase in the Reynolds number and a redistribution of velocity diagrams in the area under consideration, which causes a change in the erosion pattern.

In laboratory conditions, the nature of the distribution of velocities and the formation of vortices on the installation, creating a rounded flow. It is shown that, at critical Reynolds numbers, a vortex countercurrent occurs in the rounded flow at the inner shore. The impact of this velocity distribution on the erosion pattern of the various slopes of the rounded flow was analyzed.

References

- [1] Ikeda S, Parker G, Sawai K. Bend theory of river meanders. Part 1. Linear development. *Journal of Fluid Mechanics*. 1981;112: 363–377.
- [2] Ikeda S, Nishimura T. Flow and bed profile in meandering sand-silt rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1986;112(7): 562–579.
- [3] Osman MA, Thorne CR. Riverbank stability analysis. I: Theory. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1988;114(2): 134–150.
- [4] Parker G, Andrews ED. On the time development of meander bends. *Journal of Fluid Mechanics*. 1986;162: 139–156.
- [5] Sun T, Meakin P, Jossang T, Schwarz K. A simulation model for meandering rivers. *Water Resources Research*. 1996;32: 2937–2954.
- [6] Lancaster ST, Bras RL. A simple model of river meandering and its comparison to natural channels. *Hydrological Processes*. 2002;16(1): 1–26.
- [7] Kuntjoro K, Bisri M, Masreवानiah A, Suharyanto A. Modeling of discharge fluctuation influence on river meandering geometry change. *International Journal of Academic Research. Part A*. 2012;4(6): 189–196.
- [8] Duan JG, Julien PY. Numerical simulation of the inception of channel meandering. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2005;30: 1093–1110.
- [9] Kuntjoro K, Didik Harijanto. The Movement of the Regularly River Meanders on Constant Discharge. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018;9(6): 619–629.
- [10] Engelund F. Flow and bed topography in channel bend. *Journal of Hydraulic Division*. 1974;100(11): 1631–1648.
- [11] Crosato A. Simulation of meandering river processes. *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering*. Delft, The Netherlands; 1990.
- [12] Duan JG. Simulation of flow and mass dispersion in meandering channels. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2004;130(10): 964–976.

Acknowledgments. This study was supported by state program No. 0147-2019-0001 (registration No. AAAA-A18-118022090056-0) and by RFBR, project No. 18-05-00178.

* Senior Researcher of Channel Flow Dynamics and Ice Thermal Conditions Laboratory, Candidate of Technical Sciences

† Associate Professor of Department of Construction, Academy of Engineering; Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences; Channel Flow Dynamics and Ice Thermal Conditions Laboratory; Associate Professor, Department of Hydraulic, Candidate of Technical Sciences; gritsuk_ii@rudn.ru

‡ Senior Researcher of Channel Flow Dynamics and Ice Thermal Conditions Laboratory, Candidate of Technical Sciences

§ Head of Channel Flow Dynamics and Ice Thermal Conditions Laboratory, Doctor of Technical Sciences, Professor

- [13] Julien PY, Anthony DJ. Bedload motion and grain sorting in a meandering stream. *Journal of Hydraulic Research*. 2002;40(2): 125–133.
- [14] Olsen NRB. Three-dimensional CFD modelling of self-forming meandering channel. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2003;129(5): 366–372.
- [15] Sidorchuk AYu, Panin AV, Borisova OK. Pozdnelednikovye paleorusla rek Zapadnoy Sibiri [Late glacial paleorusla rivers of Western Siberia]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2008;(2): 67–75. (In Russ.)
- [16] Sidorchuk AYu, Panin AV, Borisova OK. Rechnoy stok na Vostochno-Yevropeyskoy ravnine za poslednie 20 tysyach let i problema izmeneniya urovney yuzhnykh morey [River flow on the East European Plain over the past 20 thousand years and the problem of changing the levels of the southern seas]. *Gidrologicheskie izmeneniya. Sb. 145*. Moscow: Kodeks; 2018. p. 144–168. (In Russ.)
- [17] Sidorchuk AYu, Panin AV, Borisova OK. Snizhenie stoka rek ravnin Severnoy Yevrazii v optimum golotsena [Reducing the flow of the rivers of the plains of Northern Eurasia in the optimum holocene]. *Vodnye resursy*. 2012;39(1): 40–53. (In Russ.)
- [18] Zholudev DM, Plotnikov AN, Slabozhanin GD. Izuchenie protsessov svobodnogo meandrirovaniya rek [Study of the processes of free meandering of rivers]. *Izbrannye doklady 64-y universitetskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh*. Tom. gos. arkhiv.-stroit. un-ta Publ.; 2018. p. 790–792. (In Russ.)
- [19] Maslikova OYa. Deformatsii merzlykh sklonov rek na povorote rusla pri nalichii dvizhushchikhsya sudov [Deformations of frozen river slopes at the turn of the channel in the presence of moving vessels]. *Stroitelstvo: nauka i obrazovanie*. 2018;8(3): 54–66. (In Russ.)
- [20] Lelyavskiy NS. O rechnykh techeniyakh i formirovanii rechnogo rusla [On the river currents and the formation of the river bed]. *Trudy 2-go Sezda inzhenerov-gidrotekhnikov v 1893 g*. Saint Petersburg; 1893. (*Voprosy gidrotekhniki svobodnykh rek*. Moscow: Rechizdat Publ.; 1948. p. 18–136.) (In Russ.)
- [21] Davydov LK, Dmitrieva AP, Konkina NG. *Obshchaya gidrologiya [General hydrology]*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1973. (In Russ.)
- [22] Losievskiy AI. Laboratornye issledovaniya protsessov obrazovaniya perekatov [Laboratory studies of roll formation processes]. *Trudy TsNIIVT*. 1934;36. (In Russ.)
- [23] Velikanov MA. *Gidrologiya sushy [Land hydrology]*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1974. (In Russ.)
- [24] Grishanin K.V. *Osnovy dinamiki ruslovykh potokov [Basics of channel flow dynamics]*. Moscow: Transport Publ.; 1990. (In Russ.)
- [25] Rozovskiy IL. *Dvizhenie vody na povorote otkrytogo rusla [The movement of water at the turn of an open channel]*. Kiev: AN USSR Publ.; 1957 (In Russ.)
- [26] Monin AS, Yaglom AM. *Statisticheskaya gidromekhanika. Mekhanika turbulentsi. Chast I [Statistical hydromechanics. Mechanics of turbulence. Part I]*. Moscow: Nauka Publ.; 1965. (In Russ.)
- [27] Melnikova ON, Petrov VP, Maslikova OYa. Eksperimentalnoe issledovanie massoobmena v pridonnom sloe otkrytogo potoka so statsionarnymi volnami [Experimental study of mass transfer in the bottom layer of an open flow with stationary waves]. *Vestnik MGU. Seriya 3: Fizika. Astronomiya*. 1994;35(5): 59–66. (In Russ.)
- [28] Debolskiy VK et al. *Dinamika ruslovykh potokov i litodinamika pribrezhnoy zony moray [Dynamics of channel flows and lithodynamics of the coastal zone of the sea]*. Moscow: Nauka Publ.; 1994. (In Russ.)

For citation:

Maslikova OYa, Gritsuk II, Ionov DN, Debolsky VK. Influence of speed distribution in a rounded flow on the character of slopes erosion. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(1): 85–95. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-85-95 (In Russ.)



Научная статья

DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-96-104

УДК 338.984

Типовые модели разработки комплексных медно-порфировых месторождений Дальнего Востока России

А.С. Десяткин*, В.М. Усова†, Е.М. Котельникова‡

* Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, *Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23*

‡ Российский университет дружбы народов, *Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6*

История статьи:

Поступила: 10 октября 2018

Доработана: 25 января 2019

Принята: 12 февраля 2019

Ключевые слова:

медно-порфировый тип месторождений;
полезные ископаемые;
;геологоразведочные работы;
типовая модель разработки;
Дальний Восток

Рассмотрены перспективы разработки медно-порфировых месторождений, открытых в пределах наиболее крупных рудопоявлений и перспективных площадей Дальнего Востока России. Переоценка больших запасов меди с учетом попутных элементов (золота, серебра, молибдена) на основе полученных геологических данных повышает экономическое обоснование освоения уже открытых месторождений, а также продолжения геологоразведочных работ на выявленных рудопоявлениях. Проведение геологоразведочных работ в определенной последовательности обуславливает необходимость составления комплексных прогнозно-поисковых и многофакторных моделей разработки крупных медно-порфировых месторождений Дальневосточного региона РФ. Комплексные модели объектов прогноза и поисков формируются применительно к каждому геолого-промышленному типу. В статье предложены типовые модели разработки комплексных медно-порфировых месторождений на различных стадиях проведения геологоразведочных работ. Модели отражают особенности глубинного строения объектов моделируемого класса и главные черты их рудно-метасоматической и геохимической зональности, а также тенденции изменения состава и физических свойств рудоконтролирующих геологических тел с глубиной. Представлены теоретические основы прогнозно-поисковых признаков, отражающие закономерности проявления изучаемых рудоносных площадей Дальнего Востока РФ. Проведен анализ комплекса геолого-геофизических исследований глубинного строения медно-порфировых месторождений. Сформулированы методические положения моделей разработки объектов медно-порфирового типа для повышения эффективности геолого-экономической оценки соответствующих геологических объектов. Данные подходы позволяют комплексно оценить параметры разведки и разработки месторождений с учетом экспортно-ориентированной направленности и инвестиционной привлекательности Дальневосточного региона России.

* Главный менеджер АО «Росгеология», соискатель кафедры экономики минерально-сырьевого комплекса

† Старший преподаватель департамента геологии, горного и нефтегазового дела, Инженерная академия; usova-vm@rudn.ru

‡ Ассистент, департамент недропользования и нефтегазового дела, к.г.-м.н.

© Десяткин А.С., Усова В.М., Котельникова Е.М., 2019



Введение

Складывающаяся в настоящее время ситуация на рынке цветных металлов характеризуется увеличением дефицита качественных руд, этим обосновывается необходимость пересмотра отношения к поиску и оценке новых горнопромышленных типов месторождений. Ухудшение структуры и качества разведанных запасов приводит к трансформации всей минерально-сырьевой базы меди. На протяжении последних десятилетий отечественная сырьевая база меди, в отличие от большинства зарубежных, базировалась не на медно-порфировых месторождениях, а на объектах сульфидного медно-никелевого, стратиформного и колчеданного геолого-промышленных типов [1].

Одно из основных направлений увеличения ресурсной базы — вовлечение в отработку новых медно-порфировых месторождений. Медно-порфировые месторождения представляют собой крупные комплексные месторождения размером до первых километров, обладающие незначительным содержанием и огромными запасами с низкой себестоимостью за счет открытой добычи (не менее 500 тыс. т меди и 150—200 т золота при среднем содержании 0,5—1 % меди и 0,6—1 г/т золота). Такие месторождения содержат несколько полезных компонентов, которые целесообразно добывать и затем реализовывать в различных отраслях экономики.

Основными направлениями дальнейшего развития минерально-сырьевого комплекса на ближайшее будущее являются освоение высокоперспективных медно-порфировых месторождений Дальнего Востока — Песчанка, Баимское и Малмыж, а также изучение перспективных и потенциально перспективных рудных районов, узлов и проявлений в пределах системы вулканоплутонических поясов Дальнего Востока.

1. Модели разработки медно-порфировых месторождений

Проведение геологоразведочных работ на медно-порфировых объектах в определенной последовательности обуславливает необходимость составления комплексных прогнозно-поисковых и многофакторных моделей разработки медно-порфировых месторождений. Комплексные модели объектов прогноза и поисков комплексных медно-порфировых месторождений строятся для каждого

типа (рудноформационного или геолого-промышленного).

Данные модели составляют на основе разработанных прогнозно-поисковых признаков, которые отражают закономерности их проявления в геологических, геофизических, минералого-геохимических характеристиках изучаемых рудоносных площадей [2].

Модели разработки комплексных медно-порфировых месторождений Дальнего Востока РФ должны отражать основные черты рудно-метасоматической и геохимической зональности, особенности глубинного строения объектов моделируемого класса и тенденции изменения состава и физических свойств рудоконтролирующих геологических тел с глубиной.

Основными приемами моделирования разработки комплексных медно-порфировых месторождений РФ являются изучение эталонных объектов, которые имеют различный уровень эрозионного среза, и объемное геолого-геофизическое моделирование эталонных объектов. На основании полученных результатов исследования конкретных объектов строится единая модель [2].

Система составления типовых моделей разработки комплексных медно-порфировых месторождений для прогноза, поисков и разведки состоит из трех этапов: работ общегеологического назначения, поиска и оценки месторождений, разведки и освоения месторождений.

2. Модели первого этапа разработки медно-порфировых месторождений

На рис. 1 представлены типовые модели первого этапа разработки комплексных медно-порфировых месторождений. Рассмотрим характерные черты таких моделей месторождений Дальневосточного региона РФ.

Геолого-генетические модели — это модели геологических процессов, которые указывают на формирование и геологическое строение металлогенических зон, рудных узлов, рудных районов, рудных полей и месторождений и дают возможность сделать прогноз условий локализации рудных тел.

Рудно-формационные модели

Для трех уровней разработки комплексных медно-порфировых месторождений Дальневосточного региона РФ — близповерхностного, субвулканиче-

ского и гипабиссального — рассматриваются геолого-генетические модели порфировых объектов на примере эталонных объектов. Классическим моделям порфировых объектов других регионов мира соответствует группа гипабиссальных проявлений [4].

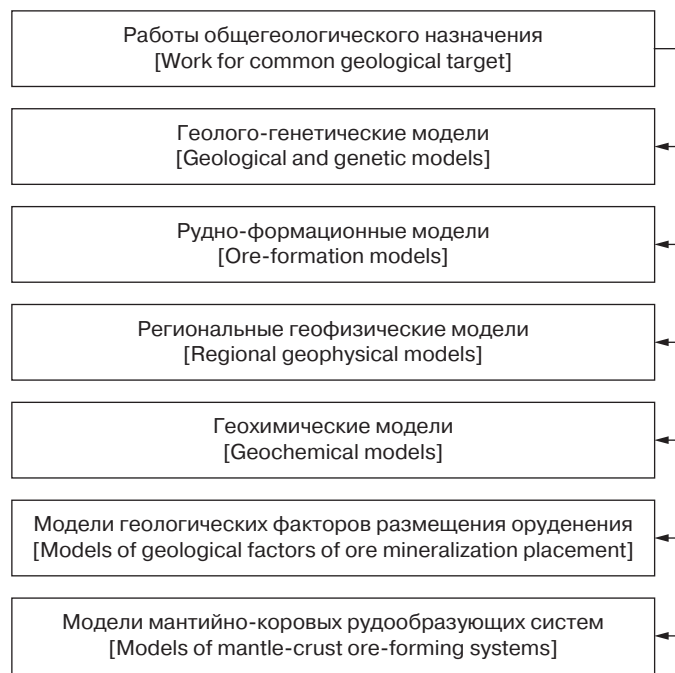


Рис. 1. Типовые модели первого этапа
[Figure 1. Typical models of the 1st stage]

Согласно принципам структурно-формационного подхода к региональному прогнозированию разработки комплексных медно-порфировых месторождений Дальневосточного региона РФ характеризуются в основном недоизученностью и недоопиcкованностью.

Поисковые геолого-геофизические модели разработки комплексных медно-порфировых месторождений Дальневосточного региона РФ позволяют оценивать физические свойства горных пород и выбирать поисковую геофизическую технологию. Обобщенные поисковые геолого-геофизические модели позволяют рационально проводить поисковые работы и осуществлять как прямые поиски сульфидных минералов меди, так и структур в которых эти минералы могут быть сосредоточены.

Оптимальный комплекс геофизических методов разработки комплексных медно-порфировых месторождений Дальневосточного региона РФ должен включать в себя такие методы, как:

- магнитометрия;
- измерения магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности;

— электроразведка с применением современных технологий.

Главным поисковым методом разработки комплексных медно-порфировых месторождений Дальневосточного региона РФ является электро-томография удельных электрических сопротивлений и вызванной поляризации. Особое внимание при работе с данными электротомографии необходимо уделять их качеству. Основное направление развития технологии электротомографии связано с увеличением соотношения «сигнал — помеха» [10].

Модели данного этапа разработки комплексных медно-порфировых месторождений относятся к работам общегеологического назначения, проводимым на стадии регионального геологического изучения недр.

3. Модели второго этапа разработки медно-порфировых месторождений

На рис. 2 представлены типовые модели второго этапа разработки комплексных медно-порфировых месторождений Дальнего Востока РФ. Рассмотрим характерные черты данных моделей.

Одним из самых эффективных и распространенных методов выявления медно-порфировых оруденений являются геохимические поиски. Стоит отметить, что на поисковой стадии геологоразведочных работ медно-порфировых месторождений определение перспективности медно-порфировых объектов по геохимическим данным представляется нетривиальной задачей.

В результате гипергенных процессов, в зависимости от климатических и ландшафтных условий, в зоне гипергенеза происходит перераспределение главных и второстепенных рудных элементов, что оказывает влияние на результаты количественной оценки их содержания в рудах и ресурсов по вторичным ореолам.

В основе прогноза оруденения на глубину лежат характеристики эндогенной зональности оруденения. Поскольку медно-порфировые, или порфирово-эпитермальные, системы, как правило, являются полистадийными и помимо медно-порфирового оруденения могут продуцировать еще несколько типов сопутствующей минерализации, выявление геохимической зональности каждой отдельной порфирово-эпитермальной системы требует индивидуального и комплексного подходов, то есть интеграции геохимических, минералогических, термобарометрических и других данных [8].



Рис. 2. Типовые модели второго этапа
[Figure 2. Typical models of the 2nd stage]

Принцип аналогии, который учитывает общие закономерности формирования месторождений полезных ископаемых разных типов, является научно-методической основой разработки типовых прогнозно-поисковых моделей разработки комплексных медно-порфировых месторождений Дальневосточного региона РФ.

Прогнозно-поисковые модели разработки комплексных медно-порфировых месторождений Дальневосточного региона РФ формируются из сопряженных и соподчиненных элементов рудоносного пространства, которые определяют геологическую обстановку локализации объекта поисков, включают геологические предпосылки, поисковые критерии и другие показатели, отражающие наличие и степень проявления рудообразующих процессов.

На их основе выделяются свойственные данному геолого-промышленному типу характеристики месторождений, помогающие определить систему поисковых методов.

Прогнозно-поисковые модели дают ответы на вопросы об облике скопления рудного вещества, его геологической обстановке и критериях оценки.

По мнению В.В. Авдониной, основными элементами прогнозно-поисковых моделей являются:

— ассоциации горных пород, рудоносные формации, их части (фазии, фазы и т.п.) в закономерных сочетаниях, определяемых структурой и палео-

тектонической обстановкой месторождения, — совокупность этих факторов определяет условия нахождения объекта;

— наличие и уровень концентрации косвенных (минеральных, химических, физических) индикаторов данного типа оруденения, выделяемых на основе применения минералогических, геохимических и геофизических поисковых методов;

— совокупность прямых признаков, указывающих на наличие данного вида полезного ископаемого;

— изменение характеристик элементов модели в зависимости от геологической обстановки (признаки скрытого оруденения, влияние перекрывающих толщ, уровень эрозионного среза, пострудные дислокации и т.д.).

В соответствии со спецификой разных стадий геологических работ при формировании прогнозно-поисковых моделей каждого типа необходимо учитывать следующие обстоятельства:

— масштабность и детальность исследования;
 — категории и виды поисковых критериев;
 — исходные и результирующие объекты моделирования;
 — виды работ;
 — формы графического представления моделей [3].

К фундаментальным свойствам геологической среды относятся характеристики геологического

вещества, геологической структуры, а также представления о динамическом или энергетическом состоянии минеральных масс и их взаимодействиях, формирующих наблюдаемую структуру.

В соответствии с классической механикой геолого-структурные модели разработки комплексных медно-порфировых месторождений Дальневосточного региона РФ включают представления о геологических структурах в наблюдаемом виде (геостатика), а также представления о силах, условиях и механизмах формирования структуры объекта (палеогеодинамика).

Такие модели качественно отличаются от моделей, создаваемых на базе историко-геологических принципов. В основе построения геолого-структурных моделей лежат три главных положения:

— принцип адекватности отображения реальной геологической ситуации — ориентирует на документацию реально наблюдаемых характеристик породных масс и исключает процедуры восстановления того, что предшествовало формированию наблюдаемой структуры, однако в отношении сил, условий и механизмов формирования;

— принцип выделения главного формационного мегакомплекса тектонитов зон смятия в целом и его детализации на основе классификации породных масс и структурно-вещественных комплексов;

— принцип интер- и экстраполяции при определении положения границ геологических тел и неоднородностей строения.

Принципы адекватности описания и типизации динамометаморфических породных ассоциаций, адаптированные к условиям конкретной формационно-метаморфической структуры, позволяют полнее использовать структурно-вещественный подход к разработке теоретических основ, а принцип интер- и экстраполяции — совершенствовать создание адекватных графических моделей [11].

Обязательным условием успешной работы является сочетание различных методов разработки комплексных медно-порфировых месторождений Дальневосточного региона РФ в целях разбраковки различных аномалий.

С.А. Григоровым представлена методика геохимического прогноза и поисков разработки комплексных медно-порфировых месторождений Дальневосточного региона РФ на основе фундаментальных законов самоорганизации диссипирующей среды с выявлением структурных признаков эволюции рудо- и ореолообразования на всех уровнях формирования геохимического поля.

На стадии разведки и эксплуатационной разведки месторождений при сложном геологическом строении, несмотря на высокую плотность разведочной сети, часто возникает вопрос о поиске и геометризации скрытых тел. Коллективом авторов из ИГЕМ РАН по Северо-Восточному Забайкалью разработана методика, включающая комплекс методов:

- структурно-парагенетический анализ;
- тектонофизический анализ;
- стереогеометрический анализ;
- компьютерное 3D-моделирование.

Комплекс данных методов позволяет моделировать механизм деформаций и его последствия, а при сравнении с установленной картиной распределения жильных тел — прогнозировать новые тела [12].

Исходя из петрофизических свойств вмещающих пород и руд, можно задать ограничение интервала ожидаемых значений удельного электрического сопротивления и поляризуемости, что на порядок повышает достоверность формализованной инверсии электроразведочных данных. Информацию об электрических свойствах горных пород и руд получают на основе петрофизических лабораторных измерений на образцах либо по результатам электрического каротажа бокового каротажного зондирования разведочных скважин [5].

В настоящее время исследования в области комбинированной геотехнологии, проводимые ведущими горными школами в России и за рубежом, ограничивались преимущественно изучением взаимодействия процессов физико-технических открытых и подземных геотехнологий.

Существующие методики обоснования параметров комбинированной разработки в основном предусматривают определение границ перехода от открытого к подземному способу разработки без учета возможности применения физико-химических геотехнологий, имеющих существенный резерв повышения полноты и комплексности освоения рудных месторождений за счет вовлечения в разработку бедного природного и техногенного минерального сырья.

Использование системного анализа горно-геологических, гидрогеологических, геохимических условий освоения комплексных медно-порфировых месторождений Дальневосточного региона РФ, исследование особенностей вещественного состава полиметаллических руд позволяют выявлять рудные участки, ранее не разрабатываемые традиционными физико-техническими способами добычи в силу таких факторов, как:

- особенности залегания;
- сложный минеральный состав;
- низкое содержание ценных компонентов.

Вовлечение в эксплуатацию некондиционных руд и отходов производства обеспечивает такие конкурентные преимущества предприятий отрасли, как:

- восполнение минерально-сырьевой базы горнодобывающих предприятий, снижение издержек производства на 10–15 %;
- повышение извлекаемой ценности добываемых и перерабатываемых руд на 30–40 %;
- снижение потерь полезных ископаемых в недрах на 15–20 %;
- повышение степени комплексности освоения минеральных ресурсов на 30–40 %;
- снижение экологической нагрузки [9].

Модели данного этапа используются на стадии поисковых работ и для оценки месторождений.

4. Модели третьего этапа разработки медно-порфировых месторождений

На рис. 3 представлены типовые модели третьего этапа разработки комплексных медно-порфировых месторождений. Рассмотрим их характерные черты.

Из основных характеристик для построения моделей медно-порфировых месторождений типич-

ным является набор зональных метасоматических изменений, имеющих непосредственную корреляцию с участками, богатыми рудой [6]. Наиболее яркие примеры:

- калиевые изменения;
- кварц-серицитовые вторичные изменения;
- расширенная аргиллизация;
- пропилитизация.

Обычно гипогенные аргиллитовые изменения образуются относительно поздно в процессе образования порфировой системы, но могут быть и более ранними. Некоторые исследователи доказывают, что разница между набором метасоматитов не связана с отличиями в самих порфировых системах [7].

А.В. Канцелем и А.В. Червоненкисом в 1990 году была предложена мультиструктурная модель геохимического поля, которая позволяет представить его как произведение низко- и высокочастотной функции пространственных координат, что дает возможность увеличить достоверность производимых оценок промышленных параметров месторождений полезных ископаемых.

Одна из этих координат носит шумовой характер и выступает в качестве высокочастотного случайного процесса, а другая координата является главной функцией (трендом), отражающей общие тенденции роста уровня концентраций или его снижения в пределах изучаемого объема недр.



Рис. 3. Типовые модели третьего этапа
[Figure 3.] Typical models of the 3rd stage

Мультиструктурная модель представляет поле концентраций как модулированное случайное поле, где шумовая составляющая играет роль несущей функции, а тренд — моделирующей. Они принципиально отличаются от традиционной аддитивной модели тем, что предполагают существенную зависимость между трендом и остатком тренда.

При этом характеристикой тренда выступает его уровень, а характеристиками его остатка оказываются дисперсия, спектральные и частотные свойства. Корреляционные связи между уровнем тренда и свойствами остатка (эффект модуляции) зафиксированы на природных объектах. Адекватность мультиструктурной модели подтверждается реальным геохимическим полем, что полезно в качестве дополнительного критерия при проведении прогнозно-оценочных работ [13].

Заключение

Анализ этапов моделирования разработки комплексных медно-порфировых месторождений в силу их многообразия и специфики позволяет выделить такие обобщающие факторы их применения, как комплексность, системность и использование передовых технологий проведения геолого-разведочных работ.

В настоящее время уже известные типы оруденения, являющиеся основой добычи в регионах, исчерпали свой потенциал. Существенным резервом для развития поисковых работ являются районы со сложными ландшафтно-геоморфологическими условиями, которые требуют новых методик обнаружения скрытых и перекрытых комплексных медно-порфировых месторождений.

Для повышения уровня геолого-экономической эффективности использования моделей разработки комплексных медно-порфировых месторождений необходимо:

— применять современные геохимические, изотопно-геохимические и изотопно-геохронологические методы изучения геологических объектов;

— задействовать современные методы обработки и визуализации информации, позволяющие систематизировать большие объемы разноплановых данных;

— формировать генетические модели наиболее перспективных типов рудных месторождений, обращаясь к новым современным парадигмам и достижениям в области геодинамики, петрологии, термодинамики и других направлений геологии и смежных областей.

Комплексное применение данных методик позволит повысить уровень геолого-экономической эффективности использования моделей разработки комплексных медно-порфировых месторождений РФ.

Список литературы

- [1] *Кимельман С.А.* Новая экономическая модель развития минерально-сырьевой и промышленно-перерабатывающей отраслей (предложения в решение Экспертной группы № 1 по обновлению «Стратегии — 2020»). 20 с.
- [2] *Коробейников А.Ф.* Теоретические основы моделирования месторождений полезных ископаемых: учебник для вузов. 2-е изд., испр. и дополн. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. 182 с.
- [3] *Кочнев А.П., Юренков Е.Г.* Основы типизации прогнозно-поисковых моделей // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2014. № 1 (44). С. 74—81.
- [4] *Крюков В.Г.* Эталоны порфировых объектов в Приамурье как основа прогнозирования крупнообъемного оруденения // Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов Восточной Азии. Четвертая Всероссийская научная конференция, 5—7 октября 2016 г., Благовещенск: сборник докладов. Том 1. Благовещенск, 2016. 65 с.
- [5] *Куликов В.А.* Электроразведочные технологии на этапах поиска и оценки рудных месторождений: автореф. дис. ... д-ра г.-м. наук. М., 2015. 46 с.
- [6] *Мансуров М.И.* Модели рудно-магматических систем медно-порфировых месторождений Гошгарчайского рудного поля (Малый Кавказ, Азербайджан) // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2014. № 4 (47). С. 29—42.
- [7] *Мансуров М.И., Сафари М.Г., Каландаров Б.Г., Керимов В.М., Мамедова А.Г.* Зональность оруденения и метасоматитов в медно-порфировых месторождениях Гошгарчайской рудно-магматической системы (Малый Кавказ, Азербайджан) // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 1. № 44. С. 38—54.
- [8] *Сидорина Ю.Н.* Геохимические критерии выявления и оценки медно-порфирового оруденения в Баимской меднорудной зоне (Западная Чукотка): дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М., 2016. 27 с.
- [9] *Капунов Д.Р., Рьльникова М.В.* Комбинированная разработка рудных месторождений. М.: Горная книга, 2012. 344 с.
- [10] *Ундрахтамир А., Иванова А.А.* Геолого-геофизические модели медно-порфировых месторождений Северной Монголии // ГеоБайкал-2010: материалы Первой на-

- учно-практической конференции. URL: <http://www.earthdoc.org/publication/51839> (дата обращения: 19.11.2018).
- [11] Павлова И.Г., Сахновский М.Л. Модели рудно-магматических систем молибденово-медных порфировых месторождений как основа их поисков и прогнозирования. URL: <http://tnaant.ru/rudoobrazovanie/32-modeli-rudno-magmaticheskikh-sistem-molibdenovomednyh-porfirovyyh-mestorozhdeniy-kak-osnova-ih-poiskov-ignozirovaniya.html> (дата обращения: 19.11.2018).
- [12] Итоги VIII Международной научно-практической конференции «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов», 16–18 апреля 2018 г. URL: <http://www.tsnigri.ru/index.php:itogi-viii-mezhdunarodnoj-nauchno-prakticheskoy-konferentsii&catid> (дата обращения: 26.11.2018).
- [13] Коробейников А.Ф. Теоретические основы моделирования месторождений полезных ископаемых. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. 182 с. URL: <http://portal.tpu.ru/SHARED/a/AFK/ucheba/modelirovanie.pdf> (дата обращения: 30.11.2018).

Для цитирования:

Десяткин А.С., Усова В.М., Котельникова Е.М. Типовые модели разработки комплексных медно-порфировых месторождений Дальнего Востока России // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 1. С. 96–104. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-96-104

Research paper

Standard models for exploration and development complex copper-porphyry deposits in the Far East of the Russian Federation

Alexey S. Desyatkin*, Valentina M. Usova†, Elena M. Kotelnikova‡

* Russian State Geological Prospecting University, 23 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117997, Russian Federation

† Peoples Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation

Article history:

Received: October 10, 2018

Revised: January 25, 2019

Accepted: February 12, 2019

Keywords:

copper-porphyry type of deposits;
mineral resources;
prospecting works;
standard exploration model;
Far East

The article deals with the prospects of development of copper-porphyry deposits discovered within the largest ore occurrences and prospecting areas of the Russian Far East. Revaluation of large reserves of copper with associated elements account (gold, silver, molybdenum) on geological data based increases the economic justification for the development of already discovered deposits, as well as the continuation of exploration work on the identified ore occurrences. Geological exploration in a certain sequence necessitates the preparation of complex prospecting, appraisal and multifactor models for the development of large copper-porphyry deposits in the Far Eastern region of the Russian Federation. Complex models of geological objects for prospecting and searches of complex copper-porphyry deposits are formed in relation to each geological and industrial type. In the article, authors offer exploration typical models to develop of complex copper-porphyry deposits at different stages of geological survey. The models show the features of the deep structure of the geological objects of the simulated class and the main features of their ore-metasomatic and geochemical zoning, as well as trends in the composition and physical properties of ore-controlling geological bodies with depth. Authors present the theoretical basis of prospecting and appraisal features, reflecting the patterns of manifestation of the studied ore-bearing areas in the Far East, Russia, leads the analysis the complex of geological and geophysical studies of the deep structure of copper-porphyry deposits, formulates methodical approaches for develop modelling of copper-porphyry type fields to increase an efficiency of a geological and economic assessment of these geological objects. These approaches make it possible to comprehensively assess the parameters of exploration and development of deposits, taking into account the export-oriented orientation and investment attractiveness of the Far Eastern region of Russia.

* Postgraduate student of Department of Mineral and Natural Resource Complex Economy; senior manager, Rosgeology, JSC

† Senior Lecturer of Department of Geology, Mineral Development and Oil & Gas Engineering, Academy of Engineering; usova-vm@rudn.ru

‡ Senior Lecturer, Department of Geology, Mineral Development and Oil & Gas Engineering, Academy of Engineering, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences

References

- [1] Kimelman SA. *New economic model of development of mineral resources and industrial processing industries*. Proposals to the decision of the Expert group No. 1 to update The “Strategy—2020”. (In Russ.)
- [2] Korobeynikov AF. *Theoretical bases of the modeling of mineral deposits*: textbook. Second edition. Tomsk: Polytechnic University Publ.; 2009. (In Russ.)
- [3] Kochnev AP, Yurenkov EG. Fundamentals of typification of exploration models. *Siberian branch of the Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, exploration and development of mineral deposits*. 2014;(1—44): 74—81. (In Russ.)
- [4] Kryukov VG. Standards of porphyry objects in the Amur region as a basis for forecasting large-volume mineralization. *Issues of geology and integrated development of natural resources in East Asia. Fourth all-Russian scientific conference, 5—7 October 2016, Blagoveshchensk: collection of papers*. 2016;(1). (In Russ.)
- [5] Kulikov VA. *Electrotechnologies at the prospecting and evaluate stages of ore deposits*: the thesis on competition of a scientific degree of the Doctor of Geological-Mineralogical Sciences. Moscow; 2015. (In Russ.)
- [6] Mansurov MI. Ore-magmatic systems of porphyry copper deposits models of Gasparzinho ore field (Caucasus Minor, Azerbaijan). *Scientific news of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of natural Sciences. Geology, prospecting and exploration of ore deposits*. 2014;(4—47): 29—42. (In Russ.)
- [7] Mansurov MM, Safari MG, Kalandarov BG, Kerimov VM, Mamedova AG. Zoning of metasomatites and mineralization in porphyry copper deposits Gasparticle ore-magmatic system (Caucasus Minor, Azerbaijan). *Scientific news of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of natural Sciences. Geology, exploration and development of mineral deposits*. 2018;41(1): 38—54. (In Russ.)
- [8] Sidorina YN. *Geochemical criteria for the detection and evaluation of copper-porphyry mineralization in the Baim copper-ore zone (Western Chukotka)*: thesis of Candidate of Geological and Mineralogical Sciences. Moscow; 2016. (In Russ.)
- [9] Kaplunov DR, Rylnikova MV. *Combined development of the ores deposits*. Moscow: Gornaya kniga Publ.; 2012. Available from: http://incot.ru/www/docs/exh_acc/09_rac_prirod/09_rac_prirod_itog_tez.pdf (accessed: 03.12.2018). (In Russ.)
- [10] Undrahtamir A, Ivanova AA. Geological and geophysical models of copper-porphyry deposits in Northern Mongolia. *Academic materials of the scientific and practice forum “GeoBaikal-2010”*. Available from: <http://www.earthdoc.org/publication/51839> (accessed: 19.11.2018). (In Russ.)
- [11] Pavlova IG, Sakhnovsky ML. *Models of ore-magmatic systems of molybdenum-copper porphyry deposits as a basis for their search and prediction: collection of scientific articles*. Available from: <http://tnaant.ru/rudoobrazovanie/32-modeli-rudno-magmaticheskikh-sistem-molibdenovomednyh-porfirovyh-mestorozhdeniy-kak-osnova-ih-poiskov-i-gnozirovaniya.html> (accessed: 19.11.2018). (In Russ.)
- [12] *The results of the VIII International scientific and practical conference “Scientific and methodological basis of forecasting, prospecting, evaluation of deposits of diamonds, precious and non-ferrous metals”, Moscow, April 16—18, 2018: collection of scientific articles*. Available from: <http://www.tsnigri.ru/index.php:itogi-viii-mezhdunarodnoj-nauchno-prakticheskoy-konferentsii&catid> (accessed: 26.11.2018). (In Russ.)
- [13] Korobeynikov AF. *Theoretical bases of modeling of mineral deposits*. Tomsk: TPU Publ.; 2009. Available from: <http://libed.ru/knigi-nauka/800149-5-ministerstvo-obrazovaniya-nauki-rossiyskoy-federacii-federalnoe-agentstvo-obrazovaniyu-gosudarstvennoe-obrazovat.php> (accessed: 30.11.2018). (In Russ.)

For citation:

Desyatkin AS, Usova VM, Kotelnikova EM. Standard models for exploration and development complex copper-porphyry deposits in the Far East of the Russian Federation. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(1): 96—104. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-96-104 (In Russ.)

ф. СП-1

ФГУП «ПОЧТА РОССИИ»

АБОНЕМЕНТ на журнал

18230

(индекс издания)

ВЕСТНИК РУДН
Серия «Инженерные исследования»

Количество комплектов:

на 2019 год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА

2019

ПВ	место	литер

на журнал

18230

(индекс издания)

ВЕСТНИК РУДН

Серия «Инженерные исследования»

Стоимость	подписки	_____ руб. ____ коп.	Количество комплектов:	
	переадресовки	_____ руб. ____ коп.		

на 2019 год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

Для заметок
